

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

Filip Jovanovski

Analiza alternativnih metoda usmjeravanja paketa u MPLS
mrežama

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2015.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

Analiza alternativnih metoda usmjeravanja paketa u MPLS mrežama
Analysis of Alternative Routing Methods in MPLS Networks

Kolegij: Tehnologija telekomunikacijskog prometa 2

Mentor: dr. sc. Marko Matulin

Student: Filip Jovanovski

JMBAG: 0135211835

Zagreb, rujan 2015.

SAŽETAK

U ovome radu analizirane su dvije metode alternativnog usmjeravanja u MPLS (*MultiProtocol Label Switching*) mreži, a to su *hop-by-hop* (usmjeravanje iz izvora uz prenošenje) i eksplicitno (usmjeravanje s upravljanjem iz izvorišnog čvora). Proizvoljno je definirana topologija mreže koja sadrži 17 čvorova, kao i vjerojatnosti dostupnosti grana između tih čvorova. Temeljem definiranih parametara određene su vjerojatnost blokiranja zahtjeva između svakog para izvorišnog-odredišnog čvora (NNGoS - *Node-to-Node Grade of Service*) za pojedinu metodu usmjeravanja paketa u MPLS mreži.

Ključne riječi: alternativno usmjeravanje, MPLS, NNGoS, eksplicitno usmjeravanje, *hop-by-hop* usmjeravanje

Summary

In this thesis two methods of alternative routing in MPLS (MultiProtocol Label Switching) network are analyzed. These are: *hop-by-hop* routing and explicit routing. The network topology, which consisted of 17 network nodes, and link availability probability were defined arbitrary. Based on these parameters blocking probability values were defined for each pair of source-destination node (NNGoS - Node-to-Node Grade of Service) and for each of the two routing methods in the MPLS network.

Keywords: alternative routing, MPLS, NNGoS, explicit routing, *hop-by-hop* routing

SADRŽAJ

1.	Uvod.....	1
2.	Višeuslužne mreže i vrste usmjeravanja	3
2.1.	Temeljni koncept višeuslužne mreže	3
2.2.	Razvoj MSN mreža	4
2.3.	Prednosti višeuslužnih mreža.....	5
2.4.	Slojevita arhitektura.....	5
2.4.1.	OSI referentni model.....	6
2.4.2.	Pozicioniranje MPLS u OSI referentnom modelu	8
2.5.	Općenito o protokolima usmjeravanja	8
2.5.1.	Osnove usmjeravanja.....	8
2.5.2.	Podjela usmjeravanja	9
2.6.	Autonomni sustav	10
2.6.1.	BGP	12
2.6.2.	RIP	12
2.6.3.	OSPF	12
2.6.4.	IS-IS.....	13
3.	Usporedba MPLS i tradicionalnog IP usmjeravanja	14
3.1.	IP protokol.....	14
3.2.	Usmjeravanje temeljeno na IP protokolu	14
3.3.	Potreba za MPLS	15
3.4.	Prednosti MPLS	16
4.	Implementacija MPLS usmjeravanja u paketnim mrežama.....	18
4.1	Razvoj MPLS-a	18
4.2.	Glavni elementi MPLS mreže	19
4.2.1.	MPLS zaglavlje	19
4.2.2.	Label Switch Router (LSR)	19

4.2.3.	Label Switched Path (LSP)	21
4.2.4.	The Next Hop Label Forwarding Entry (NHLFE)	21
4.2.5.	Incoming Label Map (ILM)	21
4.2.6.	Forwarding Equivalence Class (FEC)	22
4.2.7.	Label Distribution Protocols (LDP)	22
4.3.	MPLS operacije.....	22
4.4.	MPLS aplikacije.....	24
4.4.1.	MPLS TE.....	25
4.4.2.	MPLS QoS	26
5.	Određivanje puta u MPLS mrežama	29
5.1.	Usmjeravanje prometa u mreži	31
5.2.	Mrežna topologija MPLS mreže	32
5.3.	Strategija usmjeravanja uz upravljanje s izvorišnog čvora uz prenošenje.....	34
5.4.	Strategija usmjeravanja upravljanje s izvorišta.....	39
6.	Analiza vjerojatnost upotrebe puta u MPLS mreži	41
7.	Zaključak.....	44
	LITERATURA	45
	Popis slika.....	47
	Popis tablica	48
	Popis kratica	49

1. UVOD

Pitanje ostvarenja ciljeva mrežnih performansi, iskazanih u obliku QoS (*Quality of Service*) parametara, ključno je za postizanje korisničkog zadovoljstva nekom uslugom koje pružaju višeslužne mreže poput Internet mreže. Iako su QoS parametri za određene vrste usluga poznati (granične vrijednosti gubitka paketa, kašnjenja, kolebanja kašnjenja) Internet mreža i dalje isporučuje *Best Effort* razinu usluge. Izuzetak su pojedini segmenti mreže u kojima su implementirani određeni mehanizmi osiguranja kvalitete usluge (primjerice *DiffServ* ili *IntServ* mehanizmi u lokalnim/privatnim mrežama).

Kao alternativa tradicionalnom IP (*Internet Protocol*) usmjeravanju, koje je temelj današnje Internet mreže, razvijeno je MPLS (*MultiProtocol Label Switching*) usmjeravanje. Korištenjem tradicionalnog IP usmjeravanja paket putuje mrežom temeljem određene IP adrese. To zahtjeva analizu IP zaglavlja u svakom mrežnom čvoru određenog puta što negativno utječe na veličinu kašnjenja na putu, jer se uvećava vrijeme procesiranja paketa u čvorovima. MPLS usmjeravanjem smanjuje se vrijeme kašnjenja, budući da se IP zaglavlje paketa analizira samo u ulaznom čvoru u MPLS domenu, dok se u ostalim čvorovima MPLS mreže analizira samo labela paketa.

Naslov diplomskog rada je **Analiza alternativnih metoda usmjeravanja paketa u MPLS mrežama**. Materija diplomskog rada je podijeljen u sedam cjelina:

1. Uvod
2. Višeslužne mreže i vrste usmjeravanja
3. Usporedba MPLS i tradicionalnog IP usmjeravanja
4. Implementacija MPLS usmjeravanja u paketnim mrežama
5. Određivanje puta u MPLS mrežama
6. Analiza vjerojatnost upotrebe puta u MPLS mreži
7. Zaključak.

U drugom poglavlju objašnjena je višeslužna mreža od samog razvoja do prednosti koje se očituju kroz usporedbu s klasičnom mrežom koja se temelji na komutaciji kanala. Prikazane su vrste usmjeravanja i usmjerivački protokoli koji služe za prijenos podataka mrežom.

Treće poglavlje se bavi usporedbom MPLS i tradicionalnog IP usmjeravanja. Objašnjeno je usmjeravanje koje se temelji na IP protokolu. Navedeni su nedostaci takvog usmjeravanja. Shodno s time objašnjena je potreba za MPLS-om kao nadogradnjom IP usmjeravanja. Izložene su prednosti kojim MPLS može na efikasniji način riješiti problem na koje nailazi mreža poput kašnjenja.

Četvrto poglavlje obuhvaća implementaciju MPLS usmjeravanja u paketnim mrežama. Obuhvaćen je razvoj MPLS-a. Objašnjene su operacije koje se izvode pri ulasku paketa u MPLS mrežu. Putanja IP paketa, njegovo označavanje oznakom na ulaznom usmjerivaču te skidanje iste na izlaznom. Prikazani su glavni elementi MPLS mreže i njegove aplikacije.

U petom poglavlju su prikazane alternativne metode usmjeravanja paketa: usmjeravanje s upravljanjem iz izvorišnog čvora i usmjeravanje s upravljanjem iz izvorišnog čvora uz prenošenje. Napravljena su stabla usmjeravanja za MPLS mrežu na temelju tablice usmjeravanja.

U šestom poglavlju je prikazan proračun kroz dvije tablice, svaka za odgovarajuću strategiju. Naposljetku, sedmo poglavlje donosi zaključna razmatranja.

2. VIŠEUSLUŽNE MREŽE I VRSTE USMJERAVANJA

2.1. Temeljni koncept višeuslužne mreže

Višeuslužna mreža (MSN - *Multi Service Network*) može se definirati kao mreža dizajnirana za prijenos podataka za više od jedne vrste usluge i omogućavanje integracije različitih tipova usluga (prijenos govora, podataka i multimedije) preko iste prijenosne infrastrukture neovisno o prijenosnom mediju kako je i prikazano na slici 1. Uspoređujući s klasičnim, tradicionalnim mrežama kao što je javna telefonska mreža (PSTN - *Public Switched Telephone Network*) koja je dizajnirana za prijenos jedne vrste aplikacije (prijenos govora) ovakav koncept mreže kao što je višeuslužna mreža mora stvoriti i osigurati uvjete kako bi se održala dovoljna razina kvalitete usluge za prijenos više od jedne vrste aplikacija, [1].



Slika 1. Paketski bazirana višeuslužna mreža, [2]

Tradicionalne mreže su generirale velike troškove te su se očitovali problemi pri nadzoru i upravljanju svake pojedine mreže. Osim toga zahtjevi koji su postavljeni od strane korisnika tjeraju operatore da na tržištu ponude nove usluge kojima će biti konkurentni i korak ispred. Tradicionalnim pristupom se ne pruža dovoljna iskorištenost resursa te se logično nameće paketski način kao mod prijenosa podataka kojim se želi zamijeniti komutacija kanala. Korisnik želi mobilnost odnosno da u svakom trenutku može biti dostupan uz zahtijevanu kvalitetu usluge. Višeuslužna mreža, mreže nove generacije (NGN - *Next Generation Networks*) pokušavaju svojom integracijom usluga, opreme i mreža odgovoriti na trenutne i buduće zahtjeve.

2.2. Razvoj MSN mreža

Razvoj MSN mreža započinje 80-tih godina prošlog stoljeća gdje se zbog očitovanja pojedinih nedostataka kod klasične PSTN mreže kao što su nemogućnost interoperabilnosti više simultanih usluga poput digitalnog prijenosa govora i podataka počelo razmišljati o uvođenju novih rješenja kako bi se mreža unaprijedila. Organizacija ITU (*International Telecommunication Union*) i ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) forum su došli do zaključka u kojem bi unaprijeđenje išlo u smjeru implementacije inteligentnih mreža koje su bazirane na optici kako bi se uklonili prijašnji nedostaci. Sukladno tome predložena je serija preporuka kako bi se čitava ideja realizirala. Nova mreža digitalnih integriranih usluga nazvana je ISDN (*Integrated Services Digital Network*). Doneseni su novi potrebni standardi za transmisiju SONET (*Synchronous Optical Network*), multipleksiranje SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) te za komutaciju (*switching*) ATM standard. Prethodno navedeni standardi su omogućili operatorima implementaciju ATM jezgrene mreže na kojoj su bile moguće govorne usluge (PSTN) i prijenos podataka komutacijom ćelija.

U samim počecima takva mreža od strane projektanata i stručnjaka je bila zamišljena kao višeuslužna, odnosno univerzalna transportna tehnologija koja omogućuje prijenos i komutaciju svih vrsta informacija (govor, video i podaci) s kraja na kraj mreže na velike udaljenosti. Iako ATM ima obilježja spojne tehnike, koja prije svakog transfera informacije uspostavlja vezu između izvorišta i odredišta, može podržati i transport nespojnih usluga kao što je transport IP datagrama. Primarno takva mreža nije bila zamišljena za transport IP datagrama, ali je postojala mogućnost za takvu uslugu.

S vremenom kako se razvijala mreža i tehnologija uvidjeli su se neki nedostaci kod ATM-a kao što su cijene uređaja i njihovog održavanja, prevelika zaglavlja (*overhead*) kod ATM ćelija te se došlo do faze gdje se sve više ATM komutacija pokušala zamijeniti *Ethernet*-om i proizvodima koji se temelje na IP. Današnja hijerarhija razina transmissijske mreže u slojevitom prikazu ima tendenciju smanjenja skupih i složenih posrednika (ATM i SDH) između sveprisutnog IP sloja, [3].

2.3. Prednosti višeuslužnih mreža

Porast podatkovnog prometa je značajno utjecao na postojeću arhitekturu telekomunikacijske mreže. Konvergencija mreža (konsolidacija fiksne i pokretne mreže), usluga (*triple-play*, povezivost preko WLAN/2G/3G) i korisničke opreme je budućnost višeuslužnih mreža. Pojam vertikalnosti i horizontalnosti kod same arhitekture mreža naznačuje promjene u komutaciji, prijenosu i pristupnom dijelu mreža. Cilj mreža nove generacije da se arhitektura koja je danas vertikalno orijentirana okrene prema horizontalnom zasnivajući se na visokoj razini zajedničkih resursa kod prijenosa, kontrole i usluge, [4].

Shodno s time, prema [4], očituju se pojedine prednosti:

- Prednost višeuslužnih mreža je pružanje usluge koje se obrađuju neovisno. Davatelj usluge ne mora biti sastavni dio mreže već može biti povezan na rubnim mjestima javne prijenosne mreže;
- Sva inteligencija koja je potrebna za upravljanje i signalizaciju se nalazi u samoj mreži;
- Prijenosna mreža koja je optimizirana za prenošenje i komutiranje velike količine podataka;
- Sloj dostupa prisutnost različitih pristupnih medija kao što su bakreni vodovi, LMDS i mobilni sustavi.

2.4. Slojevita arhitektura

U modernim komunikacijskim sustavima koristi se slojevit pristup organizaciji svih komunikacijskih funkcija. Sukladno referentnom modelu OSI (OSI RM – *Open System Interconnection Reference Model*), definiranom 1984. godine od strane svjetske standardizacijske organizacije ISO (*International Organization for Standardization*), svaki je otvoreni sustav moguće opisati pomoću skupa slojeva vertikalno poredanih, od najnižeg prema najvišem, [5].

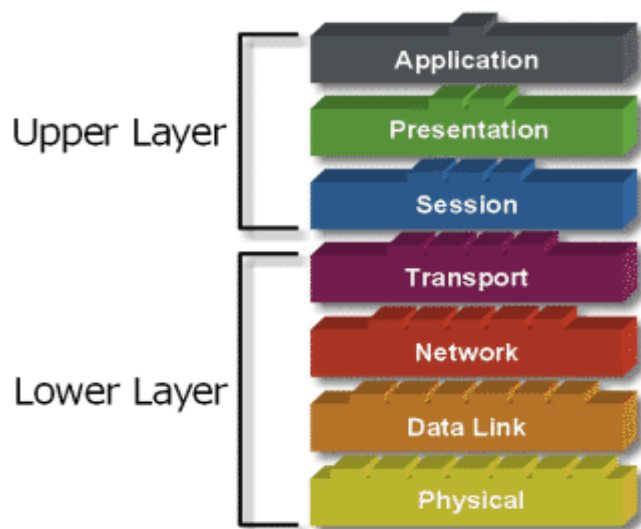
Za praktičnu primjenu slojevite arhitekture informacijske mreže potrebno je odrediti broj slojeva i funkcije koje će se u pojedinim slojevima obavljati. Izdvajanjem mrežnih funkcija u logički manje dijelove, mrežni problemi se mogu na puno lakši način riješiti. Slojevi imaju mogućnost proširivanja i nadogradnje te se slojevitom arhitekturom pridonosi da se protokoli i mrežne usluge lakše mogu razumjeti i prikazati, [6].

Problem određivanja granica između slojeva i broja slojeva je dosta složen stoga postoje osnovni principi koji nastoje riješiti taj problem poput:

- Velik broj slojeva daje jasniju sliku pri raščlanjivanju procesa u mreži;
- U slučaju potrebe za različitom razinom apstrakcije treba posegnuti za kreiranjem novog sloja;
- Svaki sloj treba izvesti vrlo dobro definiranu funkciju;
- Funkcija svakog sloja treba biti izabrana prema dobro definiranim međunarodnim protokolima;
- Granice između slojeva trebaju biti definirane kako bi se smanjio tok informacija između sučelja.

2.4.1. OSI referentni model

ISO/OSI referentni model definira sedam komunikacijskih slojeva i sučelja među njima. Razvijen s ciljem standardizacije protokola koji se koriste u različitim slojevima. Svrha modela je omogućavanje modularnosti opreme (sklopovlja i programskih paketa) u komunikacijskom lancu i interoperabilnost opreme različitih proizvođača. Uslojavanje ili podjela na slojeva je bitna stavka zbog kompleksnosti i složenosti računalnih mreža u njihovoj primjeni, [7].



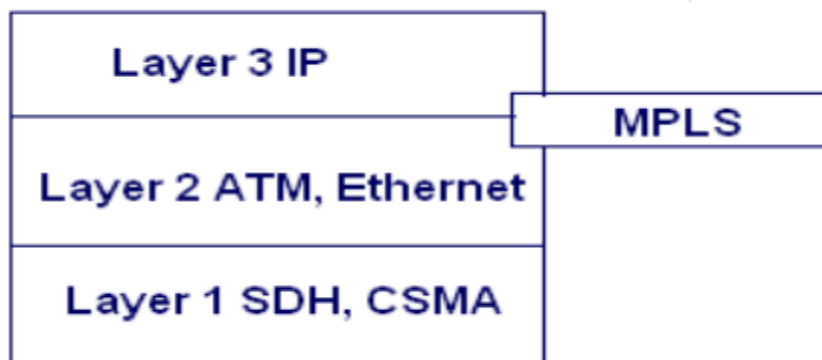
Slika 2. Prikaz OSI referentnog modela, [8]

OSI referentni model (slika 2) sastoji se od sedam slojeva koji obavljaju sljedeće funkcije:

1. Fizički sloj - podrazumijevaju se mehaničke, električne, funkcijske i proceduralne karakteristike koje omogućavaju prijenos slijeda bita (*bit stream*) kroz fizički medij.
2. Podatkovni sloj - omogućava pouzdani prijenos informacija preko linka, pakiranje podataka u okvire, kontrolu pogreški (detekcija i korekcija) te mehanizme kontrole toka.
3. Mrežni sloj - određuje prijenosne putove i obavlja funkcije komutiranja, tj. uspostavlja, održava i raskida veze. Pružanje usluge prijenosa podataka između mreža bez obzira na njihove međusobne razlike.
4. Transportni sloj - pouzdan prijenos podataka između krajnjih komunikacijskih točaka odnosno s kraja na kraj mreže.
5. Sloj sesije - osigurava strukturu za komuniciranje između aplikacija.
6. Prezentacijski sloj - odnosi se na sintaksu i semantiku podataka te omogućuje prikaz i predstavljanje u različitim tipovima podataka kako bi se računalo i mreža mogli razumjeti.
7. Aplikacijski sloj - podrazumijeva procese koji su prilagođeni korisničkom okruženju.

2.4.2. MPLS i OSI referentni model

Kako bi se MPLS tehnologija prikazala u OSI referentnom modelu napravljen je prikaz sloja koji se nalazi između 2. i 3. sloja (vidljivo sa slike 3). MPLS ima funkcije pojednostavljenog konekcijskog prosljeđivanja paketa na drugom sloju te fleksibilnost i skalabilnost trećeg sloja, stoga se za njega ne može sa sigurnošću reći da pripada mrežnom ili podatkovnom sloju. Zbog toga je odlučeno da MPLS predstavlja nadogradnju 2. i 3. sloja odnosno da je to protokol '2.5' sloja, [9].



Slika 3. Pozicija MPLS-a u OSI modelu, [10]

2.5. Općenito o protokolima usmjeravanja

2.5.1. Osnove usmjeravanja

Cilj usmjeravanja prometa u mreži je tok podataka proslijediti od izvorišta do odredišta i pri tome iskoristiti mrežu kako bi se osigurala zadovoljavajuću kvaliteta usluge. Uređaji koji su namijenjeni za obavljanje takvih funkcija nazivaju se usmjerivači. Usmjernici su zaduženi za komuniciranje i spajanje dviju mreža sa svrhom da se odredi najbolja ruta kojom će se podaci kretati između tih mreža. Usmjernici za usmjeravanje koriste usmjerivačke protokole koji omogućuju dinamičko oglašavanje i učenje dostupnih ruta kako bi usmjerivači mogli doći do zaključka o najboljoj ruti, [11].

Tablice usmjeravanja sadrže informacije o najboljim rutama između pojedinih mrežnih odredišta. Predstavljaju baze podataka kojim se usmjerivači služe pri usmjeravanju paketa kroz

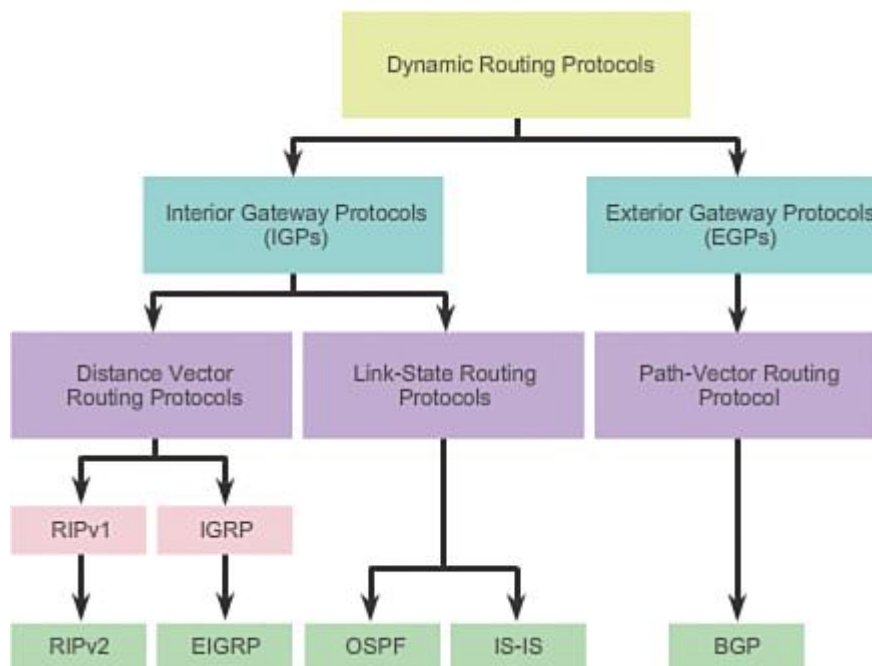
mrežu. Same tablice su pohranjene u memoriji usmjerivača, a izgradnja i održavanje se pripisuje protokolima usmjeravanja. Kako bi se smanjio broj potrebnih čitanja iz tablice i time unaprijedile performanse samog usmjeravanja u današnje vrijeme se koriste tehnike kao što je višeprotokolarno komutiranje labela koji iz jednog zapisa u tablici usmjeravanja može odrediti nekoliko sljedećih točaka na samom putu do odredišta. IP usmjeravanje je bazirano na modelu sljedećeg skoka gdje svaka tablica usmjeravanja sadrži adresu sljedećeg uređaja na putu prema svakom dostupnom odredištu. Analiza IP zaglavlja u svakom mrežnom sloju doprinosi kašnjenju i degradaciji samih performansi mreže, [12].

2.5.2. Podjela usmjeravanja

Usmjeravanje se može podijeliti na statičko i dinamičko, pri tome se misli na mrežu koja nije centralizirana što znači da se odluke donose u svakom čvoru nezavisno od drugih. Primjer takve mreže je Internet u kojem nema jednog centralnog ili središnjeg mjesta iz kojeg se upravlja već paketi putuju kroz mrežu od izvorišta do odredišta kroz čvorišta.

Najjednostavnija forma usmjeravanja je zapravo statična ruta koja je već unaprijed programirana od strane mrežnog administratora. Usmjerivač koji je programiran za statičko usmjeravanje prosljeđuje pakete na način da se prethodno izvrši konfiguracija između adrese odredišta i porta usmjerivača koji nakon toga nema potrebu za daljnjim provjeravanjem i komuniciranjem vezanih za informacijama o ruti. Ovakav oblik usmjeravanja se koristi kod manjih mreža zbog mogućnosti ručnog podešavanja. Naravno zbog složenosti veće mreže nisu sklone ovakvom pristupu već se prilagođavaju trenutnoj situaciji u mreži. Korištenjem statičkog usmjeravanja pridodaje se većoj sigurnosti same mreže, s obzirom da postoji samo jedan definiran put kojim se točno zna ulaz i izlaz iz mreže, [13].

Za razliku od statičkog usmjeravanja dinamičko se zasniva na automatskom kreiranju i ažuriranju tablica usmjeravanja. Promjene koje se mogu dogoditi u samoj topologiji mreže kao i trenutno prometno opterećenje u mreži imaju veliki značaj za samu mrežu stoga se dinamičkim usmjeravanjem rješava novonastala situacija. Tablice usmjeravanja automatski proračunavaju na temelju podataka koji se prenose prema protokolima usmjeravanja, [14].



Slika 4. Klasifikacija usmjerivačkih protokola, [15]

Postoje dvije osnovne vrste usmjerivačkih protokola, a dijele se prema načinu izračunavanja optimalnog puta na (slika 4):

- Protokole vektora udaljenosti (*Distance Vector*) – usmjerivači u mreži održavaju tablice koje sadrže informacije o najboljoj poznatoj udaljenosti za svaki prvi susjedni i odredišni čvor. Koristi se Bellman-Fordov algoritam.
- Protokole stanja veze (*Link State*) - koristi se Dijkstrin algoritam, razmjenjuju se podaci između čvorova (stanje linka i topologija mreže) i temeljem toga se algoritmom izračunava najkraći put.

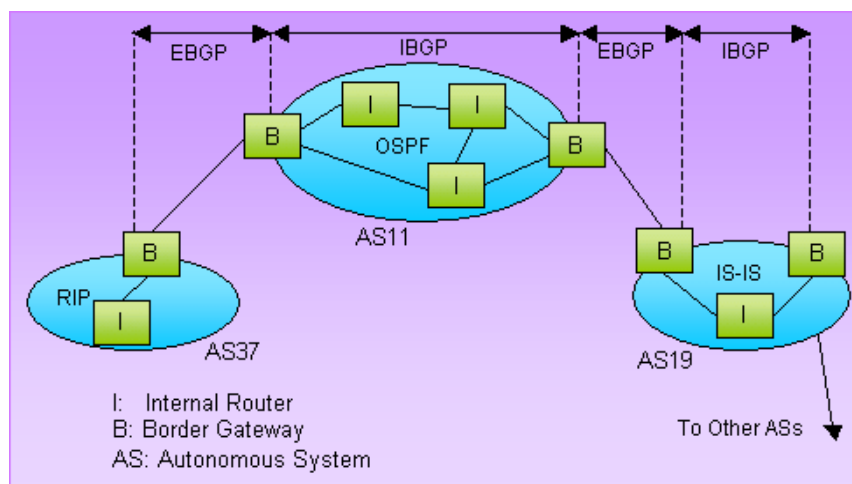
2.6. Autonomni sustav

Autonomni sustav (AS - *Autonomous System*) definira se kao povezani dio mrežne topologije odnosno više podmreža s jedinstvenom i jasno definiranom politikom usmjeravanja prema ostalim autonomni sustavima. Svaki autonomni sustav ima svoj jedinstveni identifikacijski broj tako primjerice CARNet kao primjer AS u Hrvatskoj ima broj 2108.

Protokoli usmjeravanja izvedeni su u usmjeriteljima te se temelje na algoritmu usmjeravanja. Protokoli usmjeravanja određuju oblik i sadržaj poruka koje se razmjenjuju. Od protokola usmjeravanja unutar autonomnog sustava najviše se primjenjuju *Routing Information Protocol* (RIP) verzije 2 koji se temelji na algoritmu vektora udaljenosti, *Open Shortest Path First Protocol* (OSPF) verzije 2 koji se temelji na algoritmu stanja poveznice te *Enhanced Interior Gateway Routing Protocol* (EIGRP) koji se temelji na vektoru udaljenosti, a često se koristi i kao vanjski protokol usmjeravanja između domena, [16].

Neki od primjera protokola usmjeravanja unutar AS:

- *Routing Information Protocol* (RIP);
- *Interior Gateway Routing Protocol* (IGRP);
- *Enhanced Interior Gateway Routing Protocol* (EIGRP);
- *Intermediate System to Intermediate System* (IS-IS);
- *Open Shortest Path First* (OSPF).



Slika 5. Prikaz autonomnih sustava, [17]

Iz slike 5 vidljiv je prikaz autonomnih sustava, točnije tri autonomna sustava koji sadrže svoj jedinstveni identifikacijski broj. Unutar svakog autonomnog sustava postoje protokoli usmjeravanja koji su zaduženi za usmjeravanje unutar samog sustava. Nazivaju se IBGP

(*Interior BGP*) protokolima koji mogu biti: RIP, OSPF ili IS-IS. EBGp (*External BGP*) protokoli se koristi prilikom komuniciranja između dva ili više autonomnih sustava. Za primjer sa slike između AS37 i AS11.

2.6.1. BGP

BGP (*Border Gateway Protocol*) je protokol koji je namijenjen usmjeravanju među autonomnim sustavima, koristi se kao standard pri razmjenjivanju informacija između ISP-ova, ali i između ISP-ova i većih korisnika. Ovisno o situaciji u kojoj se koristi odnosno nalazi li se unutar ili izvan autonomnih sustava postoje dva naziva. U situacijama kada se koristi između dva ili više autonomnih sustava tada se koristi naziv EBGp, dok u slučaju korištenja unutar jednog AS poznat je pod nazivom IGBP, [18].

2.6.2. RIP

RIP (*Routing Information Protocol*) je protokol koji se od samih početaka koristi na Internetu stoga se može reći da spada u najstarije usmjerivačke protokole. Funkcionira na način da šalje nove usmjerivačke poruke pravilnim intervalima ili u slučaju kada se dogodi promjena u mrežnoj topologiji. Usmjernik nadograđuje tablicu usmjeravanja novim putem u trenutku primanja usmjerivačke poruke koja uključuje promjenu. RIP je protokol vektora udaljenosti koji kao metriku koristi broj koraka, a najbolji smjer je zapravo onaj koji sadrži najmanji broj koraka ili skokova. Usmjernici su fokusirani na odabir najboljeg puta, odnosno onog koji ima najmanju moguću vrijednost metrike, no u slučaju da nova informacija nudi bolji put zamjenjuje se stara. Unutar RIP tablice usmjeravanja najdulji put predstavlja 15 skokova. U slučaju da je broj skokova veći od 15 destinacija se smatra nedohvatljivom, [19].

2.6.3. OSPF

OSPF (*Open Shortest Path First*) je usmjerivački protokol stanja veza (*link-state*) a definiran je RFC-om 2328. Razlikuje se od RIP i IGRP protokola prema načinu računanja optimalnog puta koji se računa po vektoru udaljenosti (*distance-vector*) što znači da se distribucija podataka o usmjeravanju obavlja na način da usmjerivač cijelu svoju tablicu usmjeravanja dijeli sa susjednim usmjerivačima i to u obliku ažurirajućih poruka.

OSPF koristi Dijkstra SPF (*Shortest Path First*) algoritam za pronalaženje najkraćeg puta. Funkcionira na način da se šalje obavijest između usmjerivača o stanju veze (LSA-s) u kojima su zapamćene rute odnosno putevi kojim se želi poslati podatak kroz mrežu. OSPF izabire najbolju rutu na način da pronalazi najjeftiniji put do odredišta. Prilikom komunikacije s ostalim usmjeriteljima, ne šalju se cijele tablice usmjeravanja, već se šalje samo stanje pojedinog linka. OSPF omogućuje ToS (*Type of Service*) usmjeravanje koje uključuje različite usmjeritelje, odnosno različite putove za različiti tip usluge, [20].

2.6.4. IS-IS

IS-IS (*Intermediate System to Intermediate System*) predstavlja IGP protokol koji je namijenjen usmjeravanju unutar autonomnih sustava. Protokol stanja veze, usmjerivači sadrže informacije o topologiji mreže. Poznavanjem mreže na takav način omogućava proračun rute u cijelosti od izvorišta do odredišta paketa Dijkstrinim algoritmom ili SPF, [18].

3. USPOREDBA MPLS I TRADICIONALNOG IP USMJERAVANJA

3.1. IP protokol

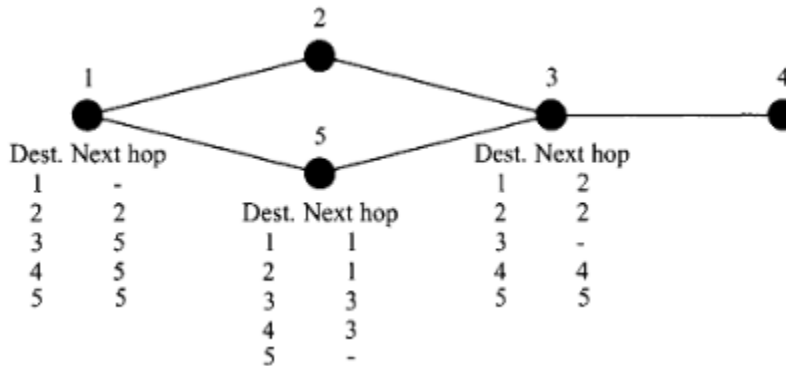
IP (*Internet protocol*) je protokol mrežnog sloja koji pruža nepouzdanu, ne konekcijsku isporuku informacija, bez garancije isporuke. Funkcionira na način da prima podatke viših slojeva te im dodaje zaglavlje koje sadrži podatke o primljenim informacijama te se dalje prosljeđuje nižim slojevima u OSI referentnom modelu. Paketi koji putuju kroz mrežu se nazivaju još i IP datagrami. Najvažnija uloga je slanje paketa u sljedeću točku usmjerenja (*next hop*), a informacije o usmjerenju se nalaze u samom zaglavlju paketa.

Postoje dvije verzije Internet protokola a to su verzija IPv4 i IPv6 s time da se danas pretežito upotrebljava verzija IPv4 koja će se s vremenom zamijeniti verzijom IPv6 zbog toga što postoji problem nedovoljnog broja IP adresa. Razlika između ove dvije verzije se očituje u duljini adrese ili adresnog prostora što ukazuje na pojavu adresiranja više korisnika. IPv6 koristi 128 bitne adrese umjesto 32 bitnih kod IPv4, te osim toga vidljive su značajnije promjene kod zaglavlja paketa, sigurnosnih mjera, dodjeljivanja i označavanja paketa, [21].

3.2. Usmjeravanje temeljeno na IP protokolu

Pod pojmom usmjerenja koje se temelji na IP protokolu podrazumijeva se klasično usmjerenje u IP mreži. Okruženje ovakvog principa usmjerenja se temelji na usmjernicima koji sadrže vlastite tablice usmjerenja. Tablica se sastoji od jedne ili više destinacija usmjernika u samoj mreži. Paket putuje kroz mrežu na način da ga prosljeđuje usmjerniku koji prije nego što paket dolazi linkom do čvora gleda zaglavlje dolazećeg paketa. Zaglavlje sadrži informacije za određivanje sljedećeg skoka, tj. identificira se sljedeći susjedni čvor i tako dalje sve dok paket ne stigne do odredišta, [10].

Slika 6 pokazuje putanju paketa koji treba iz čvora 1 stići u čvor 4. Čitanjem iz tablice se jasno vidi da je sljedeći skok u čvor 5. U tom čvoru se ponavlja postupak čitanja tablice koja pokazuje da se sljedeći skok nalazi u čvoru 3. Isti postupak se ponavlja i u tom čvoru kakao bi na kraju paket došao do čvora 4.



Slika 6. Prikaz usmjeravanja u IP mreži, [10].

Ovakav način određivanja puta (*routing*) i prosljeđivanja paketa (*fowarding*) od izvorišta do odredišta kroz mrežu posjeduje nedostatke koje se očituju kroz navedene mane:

- Usmjeravanje na mrežnom sloju – sporije za razliku od prosljeđivanja;
- Analiza zaglavlja paketa koja se izvodi pri svakom skoku kroz mrežu;
- Nepouzdana, nekonekcijska isporuka (*connectionless*) – ne podržava QoS;
- Ne koristi se dodatna metrika kod izračuna puta već se uobičajeno dizajnira najkraći put;
- Zagušenje linkova povećava gubitak paketa, duža kašnjenja i smanjenu propusnost.

3.3. Potreba za MPLS

S obzirom da se mreža poput Interneta kontinuirano proširuje te se svakim danom pojavljuju aplikacije koje nisu imune na kašnjenje, tako se u skladu s time razvila MPLS tehnologija. Uvođenjem MPLS-a se ne želi zamijeniti dosadašnje IP usmjeravanje već svojim prisustvom i upotrebom nadopunit nedostatke koji se očituju kod tradicionalnog usmjeravanja. MPLS svojim postupkom odnosno tehnikom zamjena labela (*label swapping*) prilikom prijenosa paketa kroz mrežu analizira zaglavlja paketa jednom, za razliku od tradicionalnog kod kojeg se analiza provodi pri svakom koraku od usmjerivača do usmjerivača. Potrebno je kraće vrijeme procesuiranja informacija u usmjerivačima s time da usmjerivači moraju razumjeti MPLS. Takvi

usmjerivači se nazivaju LSR-ovi koji funkcioniraju na način da obavljaju pregled i zamjenu stare oznake, koja je dodijeljena na samom ulazu u mrežu, novom. Na samom izlazu iz mreže se nalaze rubni usmjerivači poznati kao LER-ovi koji skidaju oznaku s paketa. Ovakav način predstavlja efikasnije i brže usmjeravanje u mrežama, [22].

3.4. Prednosti MPLS

Korištenjem tehnologije poput MPLS-a predstavlja mnogobrojne prednosti u odnosu na prijašnje opcije usmjeravanja podataka u mreži. Sukladno s time navedene su neke od prednosti MPLS-a koje se mogu pronaći u [23]:

- MPLS integrira brzinu i performanse značajki drugog sloja (ATM, *Frame Relay*, PPP, *Ethernet*) sa skalabilnošću i inteligencijom trećeg sloja (IP IPv4, IPv6, IPX, *AppleTalk*). Tehnologija koja nije limitirana na bilo koji posebni protokol, omogućujući konsolidaciju višeslojnih topologija;
- Funkcionira i omogućava prijenos koji se bazira na okvirima i ćelijama;
- Podržava nekoliko aplikacija i može biti proširen kroz više segmenata i tehnologija kao što su MPLS usmjerivači (LSR), IP usmjerivači i preklopnici, QoS (*Quality of Service*) podrška za sesijski-orijentirane usluge, prometno inženjerstvo, FR (*Frame Relay*) podrška, kompatibilnost VPN (*Virtual Private Network*), ATM, višeslužni preklopnici, optički *Ethernet* preklopnik (*switch*) i optički preklopnici
- Sposobnost izgradnje MPLS mreže u već postojeće mreže;
- Podrška za beskonačno slaganje labela;
- Tehnikom prosljeđivanja labela omogućava se brže i jednostavnije usmjeravanje za razliku od usmjeravanja temeljenog na IP. Smanjuje se vrijeme obrade procesa u čvorovima i povećava učinkovitost LSR-a. Doprinos poboljšanju mrežnih performansi.
- Sposobnost mreže da prilagodi sve veći broj korisnika s MPLS tehnologijom.

Tablica 1. Prikaz usporedbe pojedinih parametara

	Parametar	IP	MPLS
1	Tip komunikacije	Ne spojna tehnika	Spojna tehnika
2	Smjer toka paketa	BI direkcionalan	UNI direkcionalna
3	Broj bytova pri transferu	100-1500 bytes	Varijabilna dužina paketa
4	Metoda prosljeđivanja	Prospajanje paketa	Prospajanje paketa i krugova
5	Efikasnost	Manja u odnosu na MPLS	Veća u odnosu na IP
6	Propagacijsko kašnjenje	Veće	Manje
7	Kašnjenje	Veće u odnosu na MPLS	Manje u odnosu na IP
8	Kompleksnost	Manja u odnosu na ATM	Manja u odnosu na ATM
9	Kvaliteta usluge	Manja razina u odnosu na MPLS	Veća razina u odnosu na IP
10	Kompatibilnost	Kompatibilan sa MPLS ali ne sa ATM	Kompatibilan sa IP i ATM, te budućim tehnologijama

Tablicom 1 su prikazani pojedini parametri koji pokazuju razlike između ove dvije tehnologije. IP obavlja prospajanje paketa, za razliku od MPLS-a koji uz prospajanje paketa ima mogućnost za prospajanje krugove. Ne spojna tehnika (*connectionless*) pri komunikaciji je karakterističan za IP za razliku od MPLS-a koji spojnom tehnikom komuniciranja prije svakog transfera podataka između izvorišta i odredišta uspostavlja vezu koja se nakon završetka raskida. Efikasnost je naravno veća kod MPLS-a i to se očituje na same performanse mreže. Aplikacije kao što je MPLS TE ili QoS doprinose manjem zagušenju mreže i maksimalnom iskorištavanju mrežnih resursa. Kašnjenje se smanjuje alternativnim metodama usmjeravanja koje koristi MPLS. Primjer je eksplicitno usmjeravanje (upravljanje iz izvorišnog čvora). Kompatibilnost s budućim i sadašnjim tehnologijama, osim IP podržava i druge protokole mrežnog i podatkovnog sloja.

4. IMPLEMENTACIJA MPLS USMJERAVANJA U PAKETNIM MREŽAMA

4.1 Razvoj MPLS-a

Korijeni ili sami počeci MPLS-a sežu sredinom 90-tih godina prošlog stoljeća u brojnim pokušajima kombinacije IP i ATM tehnologije. Prvi takav pokušaj zabilježen na tržištu je bio u obliku IP komutacije koju je razvila tvrtka Ipsilon. Kako bi se natjecali s ponudama, konkurencija na tržištu je ponudila svoje verzije i proizvode. Od zapaženijih to su bili: Cisco Systems (*Tag Switching*), IBM (*Aggregate Route Based IP Switching*) i Cascade (*IP Navigator*).

Cilj svih tih proizvoda je poboljšanje u vidu propusnosti i kašnjenja kod usmjeravanja temeljenom na IP. Svi su se ustvari temeljili na istom pristupu, a to je korištenje usmjerivačkog protokola primjerice OSPF-a kako bi se definirao put, dodijeliti pakete tim putevima u mreži u kojoj se nalaze ATM komutatori koji su odgovorni za usmjeravanje paketa dužinom puta. ATM preklopnici su bili puno brži nego IP usmjerivači, a intencija je bila da se poboljšaju performanse na način da se sve svede na ATM razinu kako bi se mogla koristiti oprema kao što je ATM *switch*. Kako bi odgovorila odgovarajućom inicijativom organizacija pod nazivom IETF (*Internet Engineering Task Force*) je 1997. godine organizirala MPLS radnu skupinu koja bi radila na razvijanju zajedničkog, standardiziranog pristupa. Prvi skup propisanih standarda se čekao do 2001. godine, [24].

Ciljevi razvoja i implementacije MPLS-a mogu se predstaviti kao:

- Mogućnost promjene IP mreža u smislu zadovoljavanja sve većih zahtjeva za IP prometom;
- Omogućavanje diferencijalnih razina usluga baziranih na IP-u;
- Spajanje glasa, videa i aplikacija preko jedne IP mreže;
- Povećanje efikasnosti uz smanjenje cijene;
- Virtualne privatne mreže.

4.2. Glavni elementi MPLS mreže

4.2.1. MPLS zaglavlje

Format zaglavlja MPLS oznake (*label header*) sastoji se od 32 bita. Naziva se još i umetnutim zaglavljem (*shim header*) zbog toga što se MPLS zaglavlje umeće iza zaglavlja podatkovnog sloja i ispred zaglavlja mrežnog sloja, [25].



Slika 7. Prikaz MPLS zaglavlja, [25].

Dijelovi MPLS zaglavlja prikazani su slikom 10, a sastoji se od:

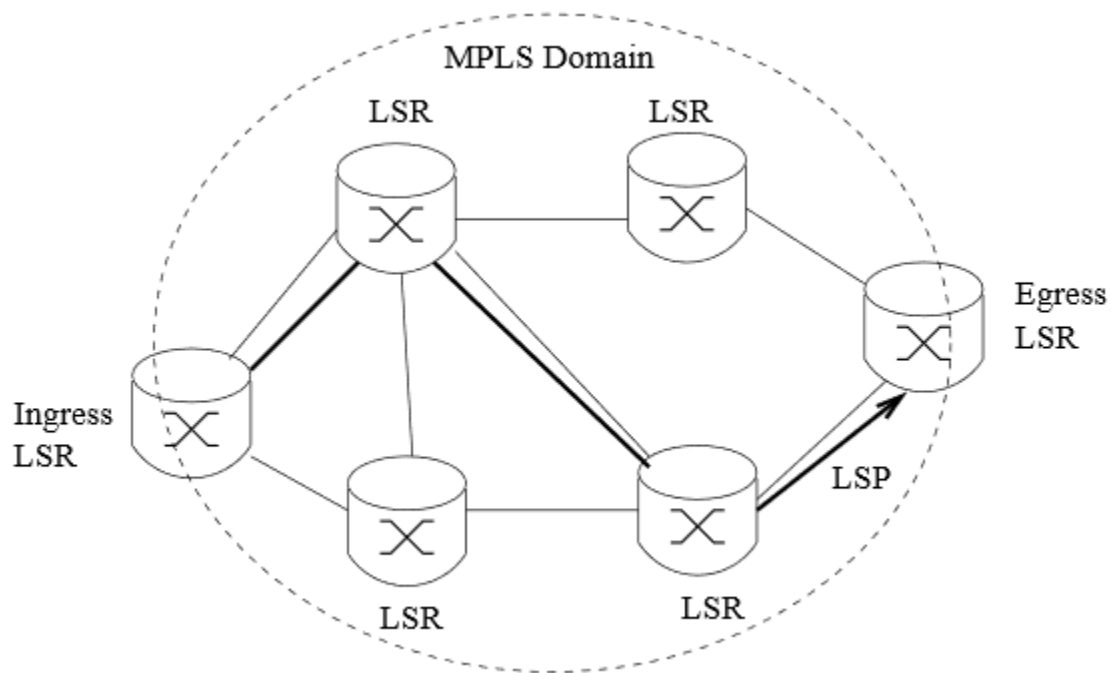
- Oznake (*Label*) – polje veličine 20 bita, opisuje putanju koju paket treba proći do odredišta;
- EXP (*Experimental use*) – polje veličine 3 bita, koristit se pri određivanju tretmana paketa. Upravljanje redovima i raspoređivanje posluživanja;
- BoS (*Bottom of Stack*) - labele se mogu nadovezivati jedna na drugu i ovo polje opisuje zadnju labelu u nizu. Veličine je jednog bita. Podržava hijerarhijske oznake složaja;
- TTL (*Time To Live*) – polje koje opisuje životni vijek MPLS paketa, TTL vrijednost se smanjuje za 1 pri prolasku paketa kroz LSR. U slučaju da je TTL jednak 0 prije odredišnog čvora dolazi do odbacivanja paketa.

4.2.2. Label Switch Router (LSR)

LSR je ruter ili usmjerivač koji spada pod fizički dio mreže element koji podržava tehnologiju MPLS-a, a to znači da je podložen razumijevanju MPLS oznaka pri čemu se misli na primanje i transmisiju označenih paketa na podatkovnom sloju, [26].

U MPLS mreži razlikuju se tri vrste LSR-a u mrežnoj domeni MPLS-a (slika 8):

- Ulazni LSR (*ingress* LSR) - prima neoznačeni paket kojem dodaje oznaku i šalje ga u MPLS domenu.
- Izlazni LSR (*egress* LSR) - prima označene pakete kojim uklanja oznaku i isporučuje pakete dalje. Ulazni i izlazni LSR-ovi su rubni LSR-ovi (*edge* LSR, LER).
- Posredni (*intermediate* LSR) - prima označeni paket te pregledava oznaku, uklanja staru oznaku te dodaje novu kako bi paket bio proslijeđen na unaprijed definiranom putu.

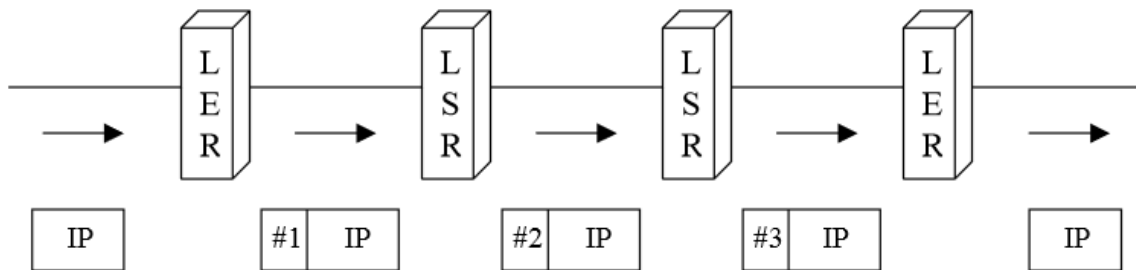


Slika 8. Prikaz MPLS domene i pripadajućih LSR-ova, [26]

LSR obavlja tri vrste operacija: stavlja jednu ili više oznaka na složaj, skida oznake sa složaja i mijenja oznake pri skoku. *Imposing* i *disposing* LSR predstavljaju ulazni odnosno izlazni LSR. Kod *imposing* LSR oznake se stavljaju na neoznačeni paket, dok kod *disposing* LSR dolazi do uklanjanja oznaka.

4.2.3. Label Switched Path (LSP)

LSP predstavlja niz povezanih LSR-ova koji komutiraju označene pakete, odnosno putanju u MPLS mreži kojom putuju označeni paketi jedne veze. Prvi LSR na LSP-u je ulazni LSR, posljednji na LSP-u je izlazni LSR. Svi LSR-ovi između su posredni. Iz slike 9 je vidljivo kako na ulaznim i izlaznim usmjerivačima paket dobiva oznaku te putuje LSR-ovima kroz mrežu kako bi na rubnom izlaznom usmjerivaču ta oznaka ponovno bila skinuta i paket nastavio svojom putanjom, [27].



Slika 9. Prikaz prolaska paketa kroz LSP, [27]

4.2.4. The Next Hop Label Forwarding Entry (NHLFE)

NHLFE se koristi pri prenošenju označenog paketa mrežom. NHLFE sadrži informacije o slijedećem skoku paketa i akciji koja se treba izvršiti na složaju oznaka paketa. Oznaka (*label*) može biti zamijenjena novom ili uklonjena sa složaja. Svaka oznaka dolazećeg paketa može biti povezana sa određenom NHLFE. U slučaju da se prometni tok podjeli na različite puteve postoji mogućnost za više NHLFE za jednu oznaku, [26].

4.2.5. Incoming Label Map (ILM)

ILM predstavlja mapu dolaznih oznaka, poznata i kao tablica prosljeđivanja labela. Opisuje mapiranje između labele dolazećeg paketa i skupa NHLFE. LSR prosljeđuje paket sučelju koji je specificiran od strane NHLFE. ILM se može usporediti s tablicom usmjeravanja kod konvencijalnog IP usmjernika, [26].

4.2.6. Forwarding Equivalence Class (FEC)

FEC predstavlja grupu ili tok paketa koji se prosljeđuju istom putanjom, a jednako su tretirani u skladu s postupkom prosljeđivanja. Svi paketi koji pripadaju istom FEC-u imaju iste oznake, ali svi paketi koji imaju iste oznake ne moraju pripadati istom FEC-u, jer im se EXP oznake mogu razlikovati, postupak prosljeđivanja može biti drugačiji i mogu pripadati drugačijim FEC klasama. Usmjerivač koji odlučuje kojoj klasi pripada koji FEC je logično ulazni LSR koji klasificira i dodaje oznaku paketu,[26].

4.2.7. Label Distribution Protocols (LDP)

LDP koristi se u procesu postavljanja puta. LSR obavještava putem LDP-a drugi LSR o napravljenosti poveznici oznake/FEC-a. Takvi LSR-ovi se nazivaju *label distribution peers*. Odluku o povezivanju posebne oznake za posebni FEC donosi silazni (*downstream*) LSR. Povezivanje oznaka može biti napravljeno na dva načina. U prvom LSR zahtijeva od susjednog LSR povezivanje za posebni FEC, dok u drugom silazni LSR povezuje bez potražnje od susjednog LSR kao u prvom modelu. MPLS dopušta tri LDP kao što su: LDP, CR-LDP i RSVP-TE, [26].

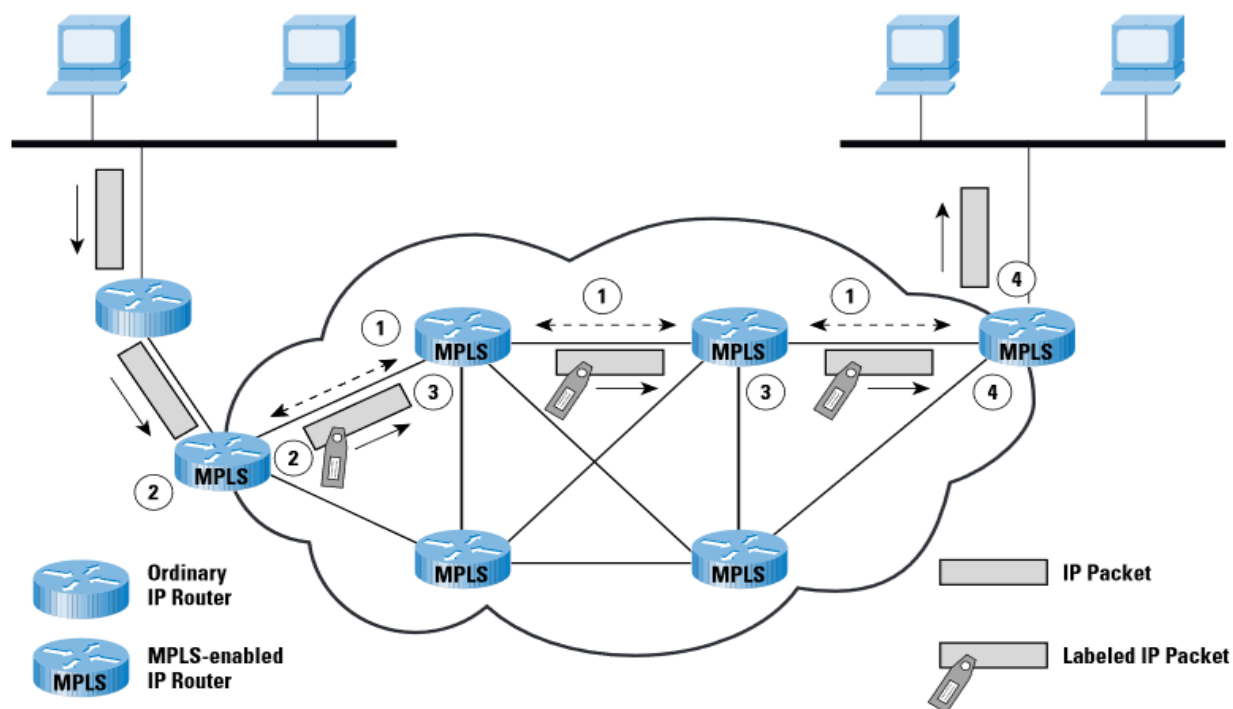
4.3. MPLS operacije

Na slici 10 prikazane su osnovne MPLS operacije u procesu usmjeravanja paketa u MPLS domeni. Kako se navodi u [24] one uključuju:

1. Prije samog usmjeravanja i dostave paketa određenom FEC-u, mora biti definiran put kroz mrežu znan kao LSP (*Label Switched Path*) i moraju biti uspostavljeni parametri kvalitete usluge (QoS) duž tog puta. Parametri QoS određuju:
 - Koliko je potrebno resursa kako bi se uspostavio put;
 - Koja se politika čekanja i odbacivanja mora uspostaviti u svakom LSR-u za pakete u tom FEC-u.

Kako bi se ostvarili ovi zadaci potrebna su dva protokola za razmjenu potrebnih informacija između usmjerivača:

- a. Unutarnji protokoli usmjeravanja, kao što su: OSPF, IS-IS koji ustanovljuju dostupnost odredišta i usmjeravaju informacije;
 - b. Protokoli kao što su LDP ili poboljšana vrijednost RVSP u svrhu kada mrežni operator ručno specificira eksplicitnu rutu i dodjeli odgovarajuće vrijednosti labeli. Tada se koriste navedeni protokoli za određivanje rute i uspostavljanje vrijednosti labela između susjednih usmjernika. LDP vrši preslikavanje FEC klasa na oznake.
2. Paket ulazi u MPLS domenu kroz ulazni, rubni LSR gdje se procesira kako bi se odredilo kojem mrežnom sloju usluga pripada, definirajući pritom kvalitetu usluge. LSR dodjeljuje paket određenom FEC-u a time i određeni LSP dodajući odgovarajuću oznaku paketu i prosljeđuje paket. Ako ne postoji LSP za taj određeni FEC, rubni LSR mora surađivati sa ostalim LSR-ovima kako bi se definirao novi LSP.
3. Svaki LSR u MPLS domeni prima pakete i obavlja funkcije:
 - a. Skidanja dolazeće labele i stavljanje prikladne odlazne labele na paket
 - b. Prosljeđivanja paketa sljedećem LSR-u cijelim putem (LSP).
4. LSR koji se nalazi na rubu mreže skida labelu, čita zaglavlje IP paketa i prosljeđuje paket do odredišne destinacije.



Slika 10. Prikaz MPLS operacija, [24]

4.4. MPLS aplikacije

Primjena MPLS-a se može vidjeti u više različitih aplikacija. Bez obzira na koju se aplikaciju odnosi funkcionalnost je uvijek podijeljena na kontrolni i podatkovni dio. Shodno s time aplikacije se razlikuju u kontrolnom dijelu dok u dijelu prosljeđivanja sve aplikacije koriste zajedničku oznaku, [28].

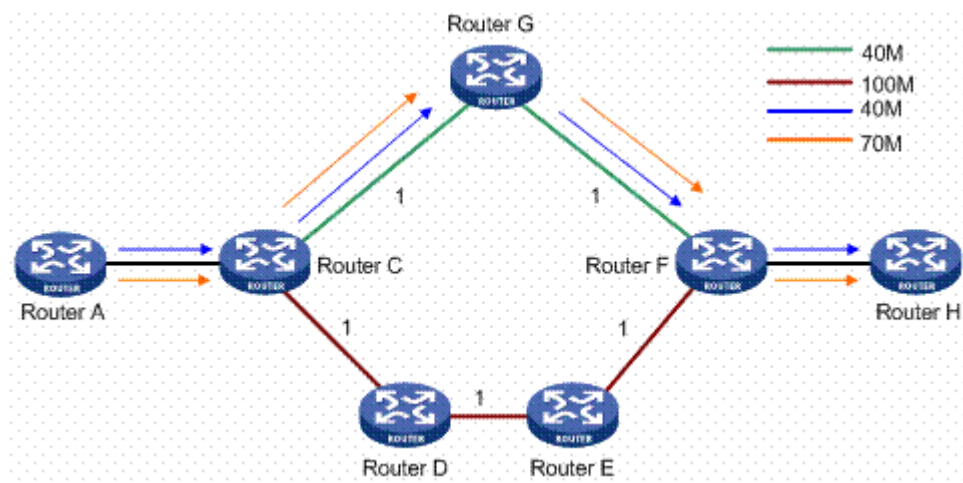
Primjer pojedinih aplikacija

- MPLS TE (*MPLS Traffic Engineering*);
- MPLS QoS (*MPLS Quality of Service*).

4.4.1. MPLS TE

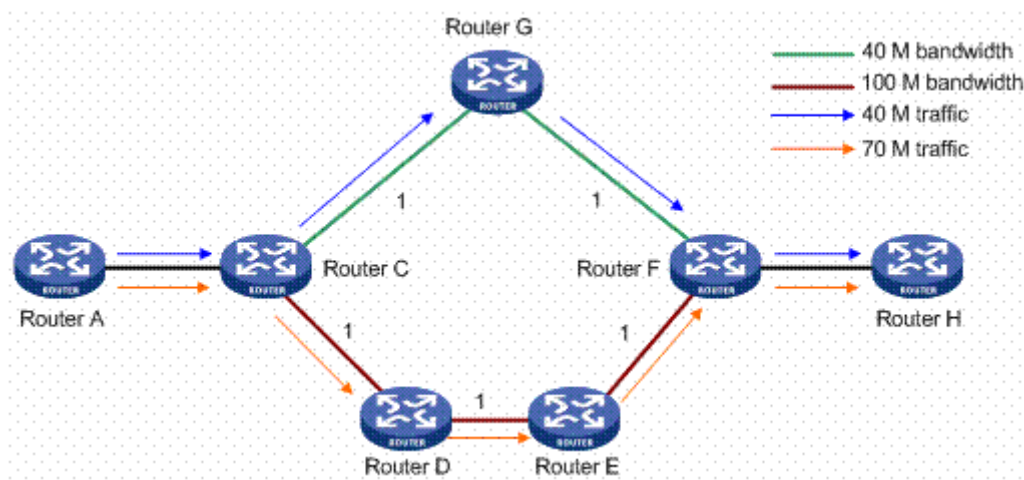
MPLS TE ili MPLS prometno inženjerstvo predstavlja jednu od najvažnijih aplikacija MPLS-a. Koristi se pretežito u mrežama davatelja usluga, u slučajevima kada u takvoj mreži postoje druge alternativne putanje kojim se paketi mogu usmjeravati od izvorišta do odredišta.

Kako je u prethodnom poglavlju objašnjeno usmjeravanje temeljno na IP funkcionira na način da se odabere najkraći put kojim se željeni promet isporučiti do odredišta. Pri tome se ne obazire da se takvim načinom može prouzrokovati zagušenje u samoj mreži zbog toga što dolazi do preopterećenja pojedinih linkova dok ostali ostaju ne iskorišteni. Na slici 11 je vidljivo da se koristi jedan put od A do H, u kojem jedna aplikacija zahtijeva propusnost od 40 Mb/s a druga od 70 Mb/s. Obje aplikacije koriste jedan put koji ima propusnost od 40 Mb/s što uzrokuje zagušenjem linka na tom putu, [29] .



Slika 11. Prikaz problema zagušenja linka tradicionalnim usmjeravanjem, [29]

Degradacija mrežnih performansi zagušenjem linka se može izbjeći upotrebom alternativnog puta kao što je vidljivo na slici 12 tako da aplikacija koja zahtijeva propusnost od 70 Mb/s ide putom (A-C-D-E-H) koji ima propusnost od 100 Mb/s. Na taj se način izbjegava prethodno opisana situacija u kojoj su obje aplikacije išle putom A-C-G-F-H.



Slika 12. MPLS TE, [29].

Ovakav način raspoređivanja može utjecati na reduciranje zagušenja u mreži a shodno s time poboljšati kvalitetu usluge u vidu smanjenja kašnjenja. Postoje tri važna segmenta ER-LSP (*explicitly routed LSP*), CSPF (*Constrained Shortest Path*) i MPLS TE tunel. CSPF je algoritam koji proračunava vezu od njenog početka pa do kraja s time da u obzir uzima propusni opseg. Konfiguracija jednosmjernog TE tunela se odvija na početnom LSR-u te se signalizacijski protokol RSVP TE koristi za rezervaciju potrebnih resursa., [29].

4.4.2. MPLS QoS

Podrška za QoS kod MPLS-a povezana je s klasom usluga - CoS (*Class of Service*). Osnovne funkcije koje čine QoS-u IP mreži su:

- Klasifikacija prometa i označavanje - s obzirom da postoje različite vrste aplikacija potrebno ih je na pravilan način tretirati u mreži. Postoje kriteriji kao što su: izvorišna i odredišna adresa, tip protokola i aplikacije. Temeljem toga se obavlja klasifikacija i označavanje. Oznaka se nalazi u DS ili ToS polju IP zaglavlja.
- Nadgledanje – postupak provjere poštivanja ugovora dolazećeg prometa. Odnosi se na interval i brzinu slanja. U slučaju ne poštivanja dogovorenog paketi se odbacuju.

- Stavljanje u redove i nasumično odbacivanje – označava slaganje prometa u redove kako ne bi došlo do odbacivanja. Postoje prioriteti pa tako primjerice glas se stavlja u red najvećeg prioriteta, dok se ostali promet stavlja u redove nižeg prioriteta.
- Raspoređivač – postoji određeni raspored po kojem se obavlja posluživanje redova. WFQ označava podjednako tretiranje redova, što odgovara slanju jednakoj količini podataka iz svakog reda u jednom period. Postoji mogućnost dodavanja težinskih faktora kako bi pojedini promet imao veći prioritet.
- Odašiljanje – potrebna fragmentacija većih paketa kako ne bi došlo do situacije u kojim paketi koji prenose primjerice glas zapnu iza većih.

Dva načina pružanja QoS u IP mreži definiran od strane IETF-a su: *DiffServe* i *IntServe*. MPLS u suradnji s *DiffServe* osigurava QoS za multimedijски promet, a da pri tome na efikasan način iskorištava mrežne resurse. *DiffServe* predstavlja model u kojem se promet grupira u klase koje imaju svoj prioritet s time i prikladan tretman u mreži. MPLS TE ili prometno inženjerstvo ima mogućnost proširenja za *DiffServe* arhitekturu. Koncept se bazira na rezervaciji propusnog opsega po klasi usluge. Na taj način se garantira bolji QoS od strane operatora te bolje iskorištenje mrežnih resursa, [30].

Osim aplikacija postoje i karakteristike kao što je:

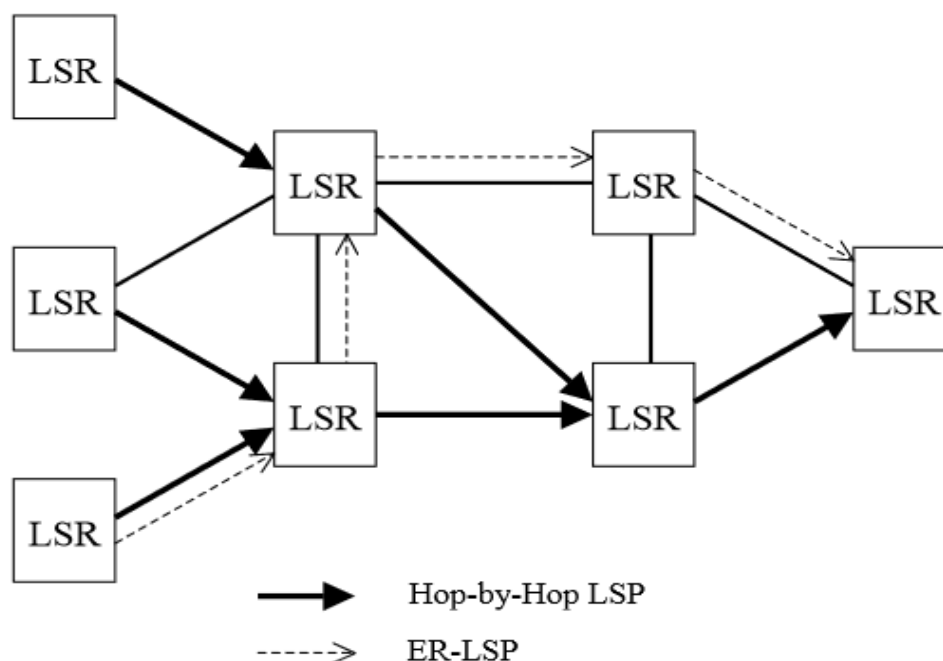
1. AToM (*Any Transport over MPLS*) koja bilo koji okvir s podatkovnog sloja prenosi kroz okosnicu MPLS-a i omogućuje da se to ostvari kroz jedinstvenu mrežnu infrastrukturu.
2. Bolja integracija IP preko ATM-a opcijom MPOA (*Multiprotocol over ATM*) u kojem ATM preklopnici (*switch*) moraju postati inteligentniji. To podrazumijeva korištenje IP usmjerivačkih protokola i implementacija LDP (*label distribution protocol*).
3. Ideja neke mreže davatelja usluga je da se implementacijom MPLS-a smanji broj rada usmjerivača u mreži. Bez implementacije svaki usmjerivač u mreži kako bi se promet odvijao do određene destinacije mora pogledati IP adresu paketa. Efikasniji način predstavlja informaciju zapisanu u labeli ili oznaci koja je

povezana s vanjskim krajnjim usmjerivačima. Usmjerivači koji se nalaze u jezgrenom dijelu mreže nemaju potrebu za korištenjem BGP zbog toga što usmjerivači u jezgrenom dijelu mreže prosljeđuju označene pakete bez da koriste i gube vrijeme na gledanje odredišta iz adrese IP paketa. Prednost ovakvog pristupa je upotreba manje memorije i smanjena kompleksnost, jer se MPLS-om sve prebacuje na izlazne usmjerivače, a jezgreni dio mreže nema potrebu za upotrebom BGP, [25].

5. ODREĐIVANJE PUTA U MPLS MREŽAMA

Uvođenje MPLS usmjeravanja uključuje implementaciju alternativnih metoda usmjeravanja paketa: usmjeravanje s upravljanjem iz izvorišnog čvora ili usmjeravanje s upravljanjem iz izvorišnog čvora uz prenošenje. Ove metode također doprinose smanjenju kašnjenja paketa, budući da se odluka o odabiru puta prepušta samo izvorišnom čvoru (kod prvo navedene metode) ili izvorišnom čvoru i određenim čvorovima na putu (kod drugo navedene metode). Time se smanjuje vrijeme procesiranja paketa, pa tako i kašnjenje paketa. Smanjenjem kašnjenja paketa utječe se i na smanjenje gubitka paketa, budući da se smanjuje broj paketa koji prekomjerno kasne.

Određivanje puta se odnosi na selekciju ili odabir LSP za pojedini FEC. MPLS arhitektura podržava dvije opcije (slika 13): *hop-by-hop* usmjeravanje (usmjeravanje s upravljanjem iz izvorišnog čvora uz prenošenje) i eksplicitno usmjeravanje (usmjeravanje s upravljanjem iz izvorišnog čvora), [27].



Slika 13. Prikaz dva načina usmjeravanja u MPLS mreži, [27]

Kod *hop-by-hop* usmjeravanja svaki LSR samostalno izabire sljedeći skok za LSP koji je baziran na IP tablicu usmjeravanja koja je naravno napravljena tradicionalnim IP protokolima npr. OSPF. Ovo je praktički zadana topologijsko temeljena metoda i dopušta otkrivanje najkraće rute. Ova opcija čak ima neke svoje prednosti kao što su brzo prosljeđivanje labelama, mogućnost uporabe složaja labela i drugačiji tretman paketa od različitih FEC-ova koji prate istu rutu. S obzirom da postoji limitiranost kod performansa metrike tradicionalnih protokola, *hop-by-hop* usmjeravanje ne podržava prometno inženjerstvo ili politiku usmjeravanja koja se odnosi na sigurnost, kvalitetu usluge i ostalih parametara.

Upotrebom eksplicitnog usmjeravanja pojedini LSR, najčešće ulazni ili izlazni LSR, specificira pojedine ili sve LSR-ove u LSP za dodijeljeni FEC. Za striktno eksplicitno usmjeravanje, LSR specificira sve LSR-ove na LSP. Za ne striktno su specificirani samo pojedini LSR. Eksplicitno usmjeravanje pokazuje sve prednosti MPLS-a uključujući sposobnost prometnog inženjerstva i politike usmjeravanja.

Eksplicitne rute mogu biti označene na način da se konfiguriraju što znači da su namještene unaprijed ili dinamički. Dinamički eksplicitne rute bi praktički omogućile i obuhvatile najbolji opseg za prometno inženjerstvo. Za dinamičko eksplicitno usmjeravanje, postavke LSR-a na LSP-u zahtijevaju tj. potrebna je informacija o topologiji MPLS domene isto kao i informacija o kvaliteti usluge koja se odnosi na MPLS domenu.

Informacije koje su vezane za kvalitetu usluge podijeljene su u dvije kategorije, te su preporučene specifikacijama MPLS prometnog inženjerstva:

- Set atributa povezanih s FEC ili kolekcijom sličnih FEC-ova koji kolektivno specificiraju karakteristično ponašanje;
- Set atributa povezanih s resursnim dijelom (čvorovi, linkovi) koji ograničava postavljanje LSP kroz njih, [32].

5.1. Usmjeravanje prometa u mreži

S obzirom da kroz mrežu postoji više mogućih puteva kojim se prometni entiteti (pozivi, poruke, paketi) mogu usmjeriti od nekog izvorišta prema odredištu potrebno je odrediti plan usmjeravanja (rutiranja) kako bi se odabrali željeni putevi prema redoslijedu prednosti. Postoje primarni i alternativni putevi kojim prometni entiteti mogu stizati na željeno odredište. Prvi izbor puta kod rutiranja, odnosno usmjeravanja u tom redoslijedu je primarni, dok su alternativni putevi ostali izbori kojim se dolazi do odredišta, [31].

Tablica rutiranja za mrežu s N čvorova ima N redaka i stupaca, u kojoj svaki element prikazuje uređen skup oznaka čvorova. Kao što je naglašeno, na osnovu tablice usmjeravanja (primjer tablice nalazi se u tablici 2) u MPLS mreži mogu se primijeniti dvije strategije alternativnog usmjeravanja:

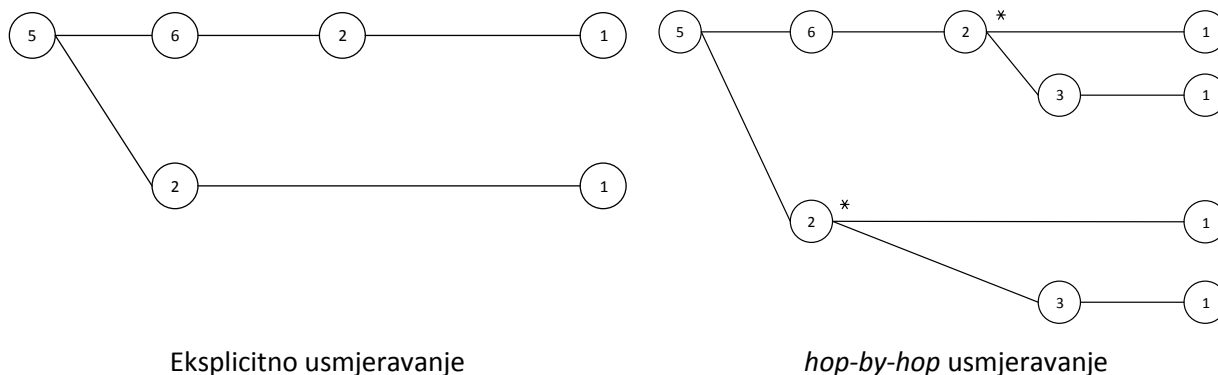
- Usmjeravanje uz upravljanje s izvorišnog čvora (alternativni izbor odlazne veze moguć je samo na izvornom čvoru, eksplicitno usmjeravanje)
- Upravljanje s izvorišta uz prenošenje (upravljanje odlukama o izboru mogućnosti prenosi se na neke od susjednih čvorova koji tada imaju i mogućnost odlučivanja kao izvorišni, *hop-by-hop* usmjeravanje)

Tablica 2. Tablica usmjeravanja

	1	2	3	4	5	6
1	x	2,3	3,2	3,2	2,3	2
2	1,3	x	3	6,3	5,6	6,5
3	1	2	x	4	2	4,2
4	3	3,6	3	x	6,3	6
5	6,2*	2,6	6	6	x	6
6	2*,4	2	2,4	4	5	x

Koristeći primjer tablice usmjeravanja (tablica 2) napravljena su stabla usmjeravanja za dvije, ranije navedene, strategije usmjeravanja i to za izvorišni čvor 5 i odredišni čvor 1. Sa slike 14 vidljivo je da kod strategije upravljanje iz izvorišnog čvora (eksplicitno usmjeravanje) postoji primarni i jedan alternativni put. S druge strane, kod upravljanje iz izvorišta uz prenošenje

vidljiv je veći izbor alternativnih puteva. To je stoga što je u tablici usmjeravanja navedeno da čvor 2 ima mogućnost odlučivanja o daljnjem usmjeravanju (oznaka 2*).

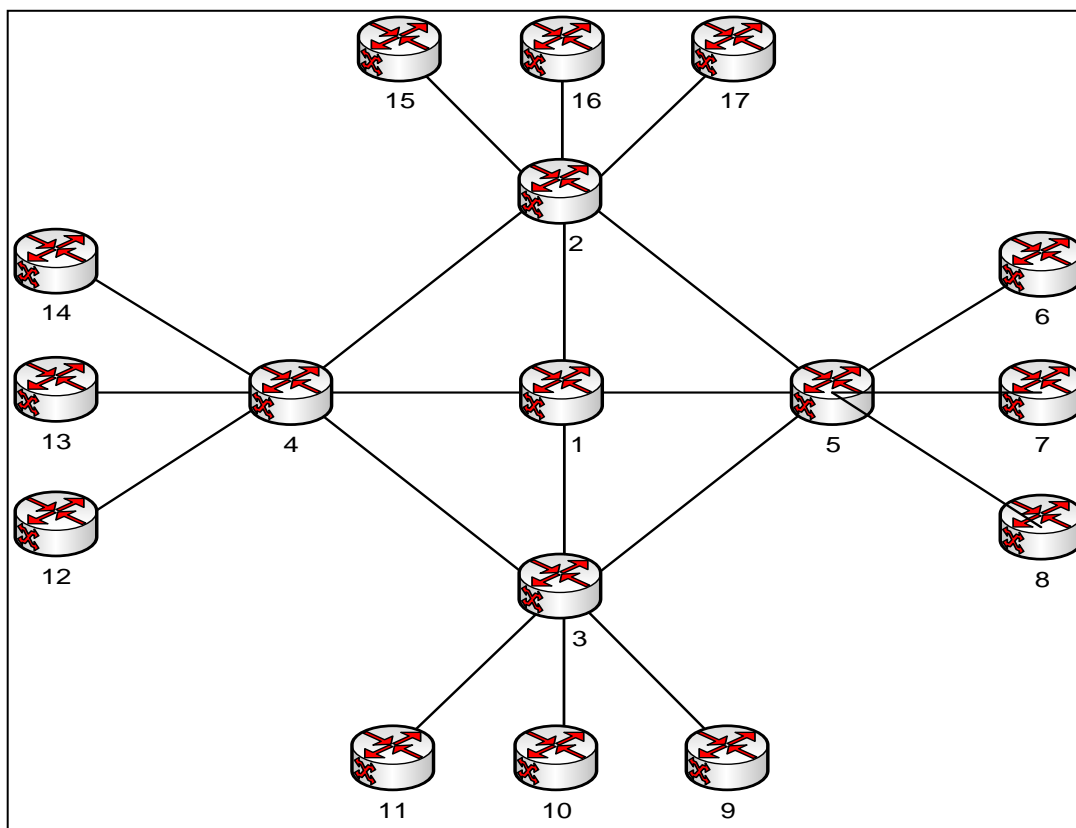


Slika 14. Stabla usmjeravanja za dvije strategije usmjeravanja

5.2. Mrežna topologija MPLS mreže

Za definiranu mrežnu topologiju (slika 15) napravljena je tablica usmjeravanja (tablica 3) i stablo usmjeravanja za pojedinu metodu usmjeravanja. Temeljem tablice i dobivenih stabala usmjeravanja napravljena je analiza vjerojatnosti upotrebe svih puteva u MPLS mreži.

Zadana mrežna topologija za MPLS mrežu sastoji se od 17 čvorova. Čvorovi koji se nalaze u samoj sredini mreže predstavljaju jezgru (*core*) mreže koja se grana na rubne dijelove mreže koju čine rubni čvorovi poput 6, 7, 8 itd. Jezgreni dio mreže čine čvorovi 1, 2, 3, 4 i 5 u kojima je vjerojatnost dostupnosti linka veća u odnosu na rubni dio mreže. Svaki link koji je povezan s čvorom 1 ima vjerojatnost dostupnosti linka od 0.99. Linkovi ili grane koje se odnose na čvorove 2, 3, 4, 5 imaju vjerojatnost dostupnosti 0.95. Za rubni dio mreže ta vjerojatnost je manja, jer se pretpostavlja da vjerojatnost blokiranja mora biti veća u odnosu na jezgru mreže. Vjerojatnosti dostupnosti linka za rubne dijelove mreže su 0.8 (čvorovi: 6, 11, 14, 15), 0.85 (čvorovi: 7, 10, 13, 16) i 0.9 (čvorovi: 8, 9, 12, 17).



Slika 15. Mrežna topologija za MPLS mrežu

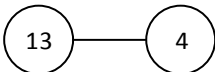
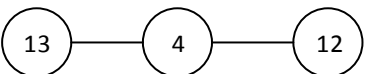
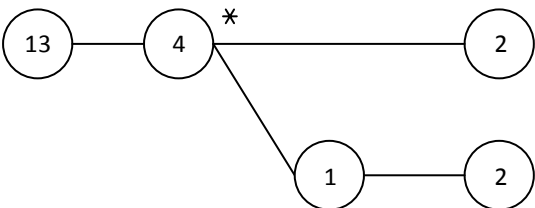
Tablica 3. Tablica usmjeravanja za zadanu MPLS mrežnu topologiju

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	x	2	3	4	5	5	5	5	3	3	3	4	4	4	2	2	2
2	1, 5	x	5*, 1	4, 1	5, 1	1, 5	5, 1	5, 1	4*, 1, 5	5, 4, 1	1, 4, 5*	4, 1	4, 1	1, 4	15	16	17
3	1	4*, 1, 5	x	4, 1	5, 1	5, 1	5, 1	5	9	10	11	4, 1	1, 4	4, 1	5, 1, 4*	5*, 1, 4	4*, 1, 5
4	1, 2, 3	2, 1	3, 1	x	3*, 1, 2*	3, 2*, 1	2*, 1, 3	2*, 1, 3	3, 1	3	3, 1	12	13	14	1, 2	2, 1	2, 1
5	1, 3	2, 1	3, 1	2, 1, 3*	x	6	7	8	3	3, 1	3, 1	2*, 1, 3	2*, 3, 1	2, 1, 3*	2	2, 1	2
6	5*	5*	5*	5*	5	x	5	5	5	5*	5*	5*	5*	5*	5	5*	5
7	5*	5*	5*	5*	5	5	x	5	5	5*	5*	5*	5*	5*	5	5*	5
8	5*	5*	5*	5*	5	5	5	x	5	5*	5*	5*	5*	5*	5	5*	5
9	3	3*	3	3*	3*	3*	3*	3	x	3	3	3*	3*	3*	3*	3*	3*
10	3	3*	3	3*	3*	3*	3*	3	3	x	3	3*	3*	3*	3*	3*	3*
11	3	3*	3	3*	3*	3*	3*	3	3	3	x	3*	3*	3*	3*	3*	3*
12	4*	4*	4*	4	4*	4*	4*	4*	4*	4	4*	x	4	4	4*	4*	4*
13	4*	4*	4*	4	4*	4*	4*	4*	4*	4	4*	4	x	4	4*	4*	4*
14	4*	4*	4*	4	4*	4*	4*	4*	4*	4	4*	4	4	x	4*	4*	4*
15	2*	2	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	x	2	2
16	2*	2	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2	x	2
17	2*	2	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2*	2	2	x

5.3. Strategija usmjeravanja uz upravljanje s izvorišnog čvora uz prenošenje

Temeljem prethodne tablice usmjeravanja za zadanu topologiju MPLS mreže napravljena su stabla usmjeravanja kako bi se prikazao put kojim se prometni entitet može kretati mrežom. Uslijed relativno velikog broja čvorova u zadanoj MPLS, te čestog podudaranja izgleda stabla za različite parove izvorišno-odredišnih (I-O) čvorova, u nastavku su prikazana karakteristična stabla usmjeravanja (navedene sličnosti su uvijek napomenute uz stabla usmjeravanja, kao što je vidljivo iz tablice 4). Za rubni dio mreže kao prikaz uzet je čvor 13, a za jezgri dio čvor 5.

Tablica 4. Stabla usmjeravanja za upravljanje s izvorišta uz prenošenje

Par I-O čvora	Stablo usmjeravanja	Identična stabla usmjeravanja za ostale I-O čvorove
13-4		2-15,2-16,2-173-9,3-10,3-11,4-12,4-13,4-14,5-6,5-7,5-8,5-9,6-5,7-5,8-5,9-3,10-3,11-3,12-4,14-4,15-2,16-2,17-2
13-12		5-9,5-15,5-16,6-7,6-8,7-6,7-8,8-6,8-7,9-1,9-10,9-11,10-1,10-9,10-11,12-13,12-14,13-14,14-12,14-13,15-16,15-17,16-15,16-17,17-15,17-16
13-2		14-2,15-4,15-5,16-1,16-4,16-5,17-1,17-4,17-5,11-4,11-5,10-4,10-5,9-4,9-5,8-1,8-2,8-3,7-1,7-2,7-3,6-1,6-2,6-3,12-2,13-3,14-3,15-1,13-3

Par I-O čvora	Stablo usmjeravanja	Identična stabla usmjeravanja za ostale I-O čvorove
13-11		10-7,10-13,9-6,9-7,9-14,8-16,7-16,6-10,11-6,11-7,11-12,11-14,12-11,12-16,12-17-13-16,13-17,14-16,14-17,15-12,15-13,16-7,16-8,17-7,17-8
13-15		14-15,15-6,15-14,16-6,16-14,17-14,17-6,11-13,9-13,12-15
13-5		14-5,8-4,7-4,12-5

Par I-O čvora	Stablo usmjeravanja	Identična stabla usmjeravanja za ostale I-O čvorove
13-7		14-7,13-8,14- 8,15-9,16-9,17- 9,11-16,11- 17,10-17,10- 16,9-14,9-17,8- 12,7-12,6-12,12- 8,12-7
13-6		14-6,12-6
15-11		10-15,8-14,7- 14,6-14

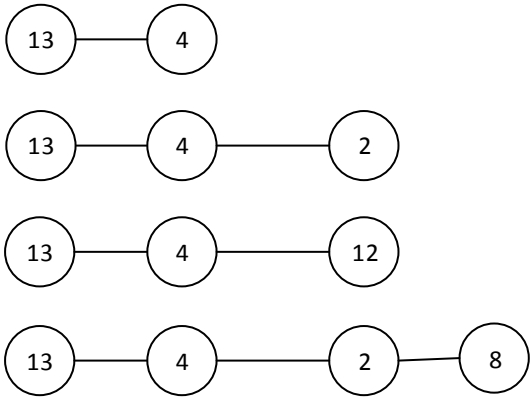
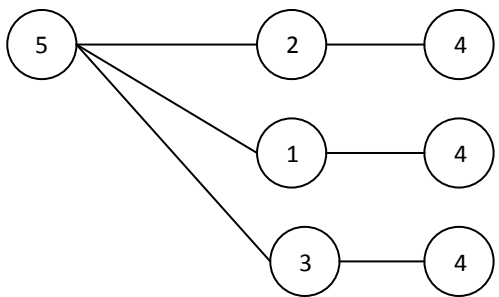
Par I-O čvora	Stablo usmjeravanja	Identična stabla usmjeravanja za ostale I-O čvorove
5-10		2-7,2-8,3-12,3-6,3-7,3-12,3-14,4-9,4-11,4-9,4-11,4-16,4-17,5-11
5-1		2-1,2-4,2-7,2-8,2-5,3-4,3-5,4-2,4-3,5-2,5-3
5-4		
5-12		2-9,3-16,3-17,4-7,4-8,

Par I-O čvora	Stablo usmjeravanja	Identična stabla usmjeravanja za ostale I-O čvorove
5-13		
5-14		2-11
2-6		3-13,4-15

5.4. Strategija usmjeravanja upravljanje s izvorišta

Kod ove strategije rubni dijelovi mreže izgledaju identično iz razloga što se grananje čvorova događa svaki put u drugom čvoru, a ne iz izvorišta. Za jezgri dio mreže grananje počinje iz izvorišta stoga su na prikazu čvora 5 vidljiva stabla usmjeravanja (tablica 5).

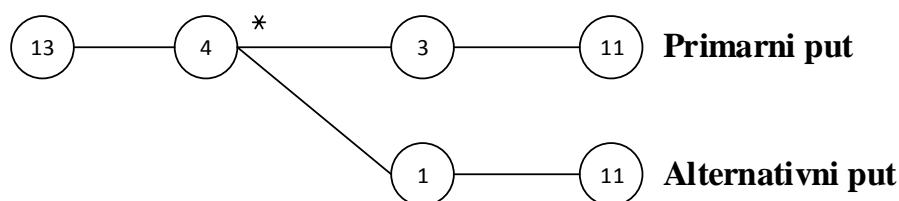
Tablica 5. Stabla usmjeravanja za usmjeravanje s izvorišta

Par I-O čvora	Stablo usmjeravanja	Identična stabla usmjeravanja za ostale I-O čvorove
13-4 13-2 13-12 13-8		čvorovi od 17-6, 5-6, 5-7, 5-8, 5-9, 5-15, 5-17, 4-12, 4-13, 4-14, 4-10, 3-1, 3-8, 3-9, 3-10, 3-11, 2-15, 2-16, 2-17 i čvor 1
5-4		3-2, 4-5

Par I-O čvora	Stablo usmjeravanja	Identična stabla usmjeravanja za ostale I-O čvorove
5-12	<pre> graph LR 5((5)) --- 2((2)) 5 --- 1((1)) 5 --- 3((3)) 2 --- 4_2((4)) 4_2 --- 12_2((12)) 1 --- 4_1((4)) 4_1 --- 12_1((12)) 3 --- 4_3((4)) 4_3 --- 12_3((12)) </pre>	2-9, 2-10, 2-11, 3-16, 3-17, 3-15, 4-7, 4-8, 4-6,
5-13	<pre> graph LR 5((5)) --- 2((2)) 5 --- 3((3)) 5 --- 1_1((1)) 2 --- 4_2((4)) 4_2 --- 13_2((13)) 3 --- 1_3((1)) 1_3 --- 4_3((4)) 4_3 --- 13_3((13)) 1_1 --- 4_1((4)) 4_1 --- 13_1((13)) </pre>	
5-10	<pre> graph LR 5((5)) --- 3((3)) 5 --- 1((1)) 3 --- 10_3((10)) 1 --- 3_1((3)) 3_1 --- 10_1((10)) </pre>	2-12, 2-13, 2-7, 2-8, 3-12, 3-13, 3-14, 3-6, 3-7, 4-9, 4- 11, 4-16, 4-17, 5-11, 5-16

6. ANALIZA VJEROJATNOST UPOTREBE PUTA U MPLS MREŽI

Kako bi se napravila analiza vjerojatnosti upotrebe puta potrebna je topologija mreže i vjerojatnosti dostupnosti linkova između čvorova, kao i tablica usmjeravanja po kojoj se kreiraju stabla s primarnim i alternativnim putevima. Pravila usmjeravanja odnose se na strategiju kojom se obavlja proračun. Za primjer izračuna upotrebe puta u MPLS mreži prikazano je stablo (slika 16) za put između zadanih čvorova 13-11 koja se odnosi na strategiju usmjeravanja iz izvorišta uz prenošenje.



Slika 16. Primjer stabla za put između čvorova 13-11

Vjerojatnosti upotrebe puta određene su koristeći se izrazima iz [31].

$$P\{U_i \text{ korišten}\} = P\{U_i \text{ dostupan i } U_1 U_2 \dots U_{i-1} \text{ nedostupni}\} \quad (1)$$

$$P\{\pi_1 \text{ korišten}\} = P\{\pi_1 \text{ dostupan}\} = X_{134} X_{43} X_{411}$$

$$P\{U_i \text{ korišten}\} = P\{U_i \text{ dostupan}\} \cdot P\{U_1, U_2, \dots, U_{i-1} \text{ nedostupni} \mid U_i \text{ dostupan}\} \quad (2)$$

$$P\{\pi_2 \text{ korišten}\} = P\{\pi_2 \text{ dostupan}\} \cdot P\{\pi_1 \text{ nedostupan} \mid \pi_2 \text{ dostupan}\}$$

$$P\{\pi_2\} = X_{134} X_{41} X_{13} X_{311} (1 - X_{43}) = X_{134} X_{41} X_{13} X_{311} Y_{43}$$

$$P\{\pi_1 \text{ korišten}\} = 0.85 * 0.95 * 0.8 = 0.646$$

$$P\{\pi_2 \text{ korišten}\} = 0.85 * 0.99 * 0.99 * 0.8 (1 - 0.95) = 0.0333234$$

NNGOS (Node-to-Node Grade of Service)

$$NNGOS = 1 - \sum P\{\pi_j \text{ korišten}\} \quad (3)$$

$$NNGOS = 1 - (0.646 + 0.0333234)$$

$$NNGOS = 0.3206766$$

Dobiveni rezultat pokazuje vjerojatnost blokiranja poziva od 32% za par čvorova 13-11. Uspoređujući sa jezgrenom dijelom mreže ovo je dosta velika vjerojatnost blokiranja zahtjeva.

Tablica 6. Proračun za usmjeravanja upravljanje s izvorišta uz prenošenje

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1		0.01	0.01	0.01	0.01	0.208	0.1585	0.109	0.109	0.1585	0.208	0.109	0.1585	0.208	0.208	0.1585	0.109
2	0.0006		0.0019	0.001	0.001	0.2008	0.1508	0.1009	0.1009	0.1502	0.1632	0.1009	0.1508	0.2008	0.2	0.15	0.1
3	0.01	0.001		0.001	0.001	0.2008	0.1508	0.145	0.1	0.15	0.2	0.1009	0.1508	0.2008	0.2001	0.1509	0.1009
4	4E-05	0.001	0.001		0.001	0.2002	0.1509	0.1009	0.1009	0.1925	0.2008	0.1	0.15	0.2	0.2008	0.1508	0.1009
5	0.0006	0.001	0.001	0.0001		0.2	0.15	0.1	0.145	0.1508	0.2008	0.1009	0.1529	0.2008	0.24	0.1508	0.145
6	0.2005	0.2008	0.2008	0.2001	0.2		0.32	0.28	0.316	0.3207	0.3606	0.2808	0.3223	0.3525	0.392	0.3207	0.316
7	0.1505	0.1508	0.1508	0.1509	0.15	0.32		0.235	0.2733	0.2782	0.3207	0.2358	0.2816	0.3267	0.354	0.2782	0.2733
8	0.1005	0.1009	0.1009	0.1009	0.1	0.28	0.235		0.2305	0.2358	0.2807	0.1908	0.2361	0.2807	0.316	0.2358	0.2305
9	0.109	0.1009	0.1	0.1001	0.1009	0.2807	0.2358	0.2305		0.235	0.28	0.1908	0.2358	0.2807	0.2801	0.2358	0.1908
10	0.1585	0.1509	0.15	0.1508	0.1508	0.3207	0.2782	0.2733	0.235		0.32	0.2358	0.2782	0.3207	0.3201	0.2783	0.2358
11	0.208	0.2008	0.2	0.2008	0.2008	0.3606	0.3207	0.316	0.28	0.32		0.2807	0.3207	0.3606	0.3601	0.3207	0.2808
12	0.1004	0.1009	0.1009	0.1	0.1009	0.2801	0.2358	0.1908	0.1908	0.2733	0.2807		0.235	0.28	0.2807	0.2358	0.1908
13	0.1503	0.1508	0.1508	0.15	0.1509	0.3201	0.2783	0.2358	0.2358	0.3136	0.3207	0.235		0.32	0.3207	0.2782	0.2358
14	0.2003	0.2008	0.2008	0.2	0.2008	0.3601	0.3207	0.2808	0.2807	0.354	0.3587	0.28	0.32		0.3606	0.3207	0.2807
15	0.2005	0.2	0.2016	0.2008	0.2008	0.3606	0.3207	0.2807	0.2808	0.3201	0.3601	0.2807	0.3207	0.3606		0.32	0.28
16	0.1505	0.15	0.1516	0.1508	0.1508	0.3207	0.2782	0.2358	0.2358	0.2776	0.3201	0.2358	0.2782	0.3207	0.32		0.235
17	0.1005	0.1	0.1017	0.1009	0.1009	0.2807	0.2358	0.1908	0.1908	0.2351	0.2801	0.1908	0.2358	0.2807	0.28	0.235	

Tablica 7. Proračun za usmjeravanja upravljanje s izvorišta

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1		0.01	0.01	0.01	0.01	0.208	0.1585	0.109	0.109	0.1585	0.208	0.109	0.1585	0.208	0.208	0.1585	0.109
2	0.0006		0.0019	0.001	0.001	0.2008	0.1508	0.1009	0.1002	0.1502	0.2002	0.1009	0.1508	0.2008	0.2	0.15	0.1
3	0.01	0.0002		0.001	0.001	0.2008	0.1508	0.145	0.1	0.15	0.2	0.1009	0.1508	0.2008	0.2008	0.1502	0.1002
4	4E-05	0.001	0.001		0.0002	0.2008	0.1502	0.1002	0.1009	0.1925	0.2008	0.1	0.15	0.2	0.2008	0.1508	0.1009
5	0.0006	0.001	0.001	0.0002		0.2	0.15	0.1	0.145	0.1508	0.2008	0.1017	0.1509	0.2008	0.24	0.1508	0.145
6	0.208	0.24	0.24	0.278	0.2		0.32	0.28	0.316	0.354	0.392	0.3502	0.3863	0.4041	0.392	0.354	0.316
7	0.1585	0.1925	0.1925	0.2329	0.15	0.32		0.235	0.2733	0.3136	0.354	0.3096	0.3479	0.3669	0.354	0.3136	0.2733
8	0.109	0.145	0.145	0.1878	0.1	0.28	0.235		0.2305	0.2733	0.316	0.269	0.3096	0.3296	0.316	0.2733	0.2305
9	0.109	0.1878	0.1	0.145	0.145	0.316	0.2733	0.2305		0.235	0.28	0.2305	0.2502	0.316	0.3502	0.3096	0.269
10	0.1585	0.2329	0.15	0.1925	0.1925	0.354	0.3136	0.2733	0.235		0.32	0.2733	0.2919	0.354	0.3863	0.3479	0.3096
11	0.208	0.278	0.2	0.24	0.24	0.392	0.354	0.316	0.28	0.32		0.316	0.3335	0.392	0.4224	0.3863	0.3502
12	0.109	0.145	0.145	0.1	0.1878	0.3502	0.3096	0.269	0.2305	0.2733	0.316		0.235	0.28	0.2943	0.2733	0.2305
13	0.1585	0.1925	0.1925	0.15	0.2329	0.3863	0.3479	0.3096	0.2733	0.3136	0.354	0.235		0.32	0.3335	0.3136	0.2733
14	0.208	0.24	0.24	0.2	0.278	0.4224	0.3863	0.3502	0.316	0.354	0.392	0.28	0.32		0.3727	0.354	0.316
15	0.208	0.2	0.278	0.24	0.24	0.3727	0.354	0.316	0.3502	0.3863	0.3727	0.316	0.354	0.3727		0.32	0.28
16	0.1585	0.15	0.2329	0.1925	0.1925	0.3335	0.3136	0.2733	0.3096	0.3479	0.3335	0.2733	0.3136	0.3335	0.32		0.235
17	0.109	0.1	0.1878	0.145	0.145	0.2943	0.2733	0.2305	0.269	0.3096	0.2943	0.2305	0.2733	0.2943	0.28	0.235	

Temeljem strategija usmjeravanje s upravljanjem iz izvorišnog čvora i usmjeravanje s upravljanjem iz izvorišnog čvora uz prenošenje izračunat je NNGOS za sve parove I-O čvorova. Rezultati za tablicu koja se odnosi za strategiju usmjeravanja s upravljanjem iz izvorišnog čvora nalazi se u tablici 6. Za strategiju usmjeravanja s upravljanjem iz izvorišnog čvora nalazi se u tablici 7.

Vrijednosti u tablici su obojane ovisno o samoj veličini NNGOS-a. Iz priloženog je vidljivo da svjetlije nijanse predstavljaju manji NNGOS, dok vrijednosti koje su obojane tamnijim nijansama pokazuju veći NNGOS. Najsvjetliji dio tablice je zapravo onaj dio koji sačinjava jezgru mreže sa čvorovima 1 -5. U tom dijelu mreže su najveće dostupnosti grana od 0.99 i 0.95. U trenutku kada zahtjev izlazi iz jezgrenog dijela mreže u rubne dijelove mreže vjerojatnost NNGOS-a raste.

7. ZAKLJUČAK

Implementacijom MPLS u paketnim mrežama postiže se fleksibilnost i skalabilnost usmjeravanja na 3. sloju. Korištenjem MPLS-a u IP mrežama se želi nadopuniti usmjeravanje koje je bazirano na odabiru najkraće rute. Usmjeravanje temeljeno na IP je pokazalo nedostatke kao što su zagušenje mreže, kašnjenje i gubitak pakete. Tehnologijom kao što je MPLS se na efikasan način rješavaju problemi kašnjenja na način da se smanjuje vrijeme procesuiranja u čvorovima, jer se prosljeđivanje ne obavlja na temelju informacija u zaglavlju IP paketa. Koncept s označavanjem IP paketa labelama koji putuje MPLS domenom zasniva se na provjeravanju oznaka u mreži koju obavljaju LSR-ovi te se zaglavlje analizira samo jednom.

Prometno inženjerstvo je bitna karakteristika u optimizaciji mrežnih resursa te smanjenju zagušenja linkova. MPLS TE uključuje propusni opseg kao parametar koji je bitan pri usmjeravanju. U slučaju da mreža ima više puteva, MPLS TE može usmjeriti promet na drugu rutu kako na prvoj ne bi došlo do zagušenja linkova. Na taj način se poboljšavaju performanse same mreže te su bolje iskorišteni mrežni resursi.

Temeljem MPLS mrežne topologije napravljena su stabla usmjeravanja za dvije strategije koje se koriste kod MPLS-a: usmjeravanje s upravljanjem iz izvorišnog čvora i usmjeravanje s upravljanjem iz izvorišnog čvora uz prenošenje. Shodno s time napravljen je proračun za obje strategije u obliku prikladnih tablica. Dobiveni rezultati iz proračuna pokazuju da je vjerojatnost blokiranja poziva u jezgrenom dijelu mreže od čvorova 1-5 minimalna, odnosno do 1 %. Takav ishod je zapravo i logičan slijed zbog toga što u jezgrenom dijelu ne postoji puno alternativnih puteva kojim se promet može kretati te su vjerojatnosti dostupnosti linka veće u odnosu na rubni dio. Rubni dijelovi bilježe veće vjerojatnosti blokiranja što se vidi uporabom gradijenta između žute i crvene boje. Izgled i veličina stabala se razlikuje, pa tako kod strategije usmjeravanja upravljanja iz izvorišnog čvora stabla izgledaju manje kompleksna a osim toga čvorovi koji se nalaze na rubu mreže izgledaju kao primarni putevi zbog početka grananja iz drugoga čvora a ne iz izvorišnog. NNGOS vrijednosti za obje strategije vezane za jezgru mreže su praktički iste dok za rubni dio mreže vrijednosti su malo veće kod usmjeravanja upravljanjem iz izvorišta.

LITERATURA

1. Bošnjak, I: Tehnologija telekomunikacijskog prometa II, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2000
2. http://www.e-tutes.com/lesson13/networking_fundamentals_lesson13_3.htm
3. <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=426645> (kolovoz 2015.)
4. http://www.ericsson.com/hr/etk/revija/Br_2_2004/komutacijski_sustavi.pdf (kolovoz 2015.)
5. Bažant, A., Gledec, G., Ilić, Ž., Ježić, G., Kos, M., Konštić, M., Lovrek, I., Matijašević, M., Mikac, B., Sinković, V.: *Osnovne arhitekture mreža*, Element, Zagreb, 2004.
6. <http://www.sans.org/reading-room/whitepapers/standards/osi-model-overview-543>
7. <http://www.cis.hr/www.edicija/LinkedDocuments/CCERT-PUBDOC-2009-01-253.pdf> (srpanj 2015.)
8. http://www.bpsharma.in/eLearning/Networking/OSI_Reference_Model.htm
9. http://www.lightriver.com/uploadfiles/pdf/LightRiverTechByte_MPLS_Layer%202_5.pdf (kolovoz 2015.)
10. <http://www.ijitee.org/attachments/File/v2i5/E0680032413.pdf>
11. http://spvp.zesoi.fer.hr/seminari/2006/SovicMarina_Protokolizausmjeravanje.pdf (kolovoz 2015.)
12. <http://www.cis.hr/www.edicija/LinkedDocuments/CCERT-PUBDOC-2008-02-220.pdf> (srpanj 2015.)
13. <http://www.cisco.com/cpress/cc/td/cpress/fund/iprf/ip2907.html> (kolovoz 2015.)
14. https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/287455/mod_resource/content/1/Predavanja/2012-2013/PR6_2013.pdf (kolovoz 2015.)
15. <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=2180210&seqNum=7>
16. Bažant, A.: *Telekomunikacije-tehnologija i tržište*, Element, Zagreb, 2007.

17. <https://www.pinterest.com/pin/478437160389819582/>)
18. <http://www.cis.hr/www.edicija/LinkedDocuments/CCERT-PUBDOC-2007-02-183.pdf>
(kolovoz 2015.)
19. <http://sistematic.carnet.hr/node/651> (srpanj 2015.)
20. https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/287455/mod_resource/content/1/Predavanja/2012-2013/PR6_2013.pdf (kolovoz 2015.)
21. http://www.ericsson.hr/etk/revija/Br_1_2001/prijenos_govora.htm (srpanj 2015.)
22. Mrvelj, Š: Predavanja iz kolegija „*Tehnologija telekomunikacijskog prometa II*“ Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2014.
23. <http://services.eng.uts.edu.au/~kumbes/ra/Emerging/MPLS/MPLS.htm#35>
24. http://www.cisco.com/web/about/ac123/ac147/archived_issues/ipj_4-3/ipj_4-3.pdf
(kolovoz 2015.)
25. De Ghein, L.: MPLS Fundamentals, Cisco Press, Indianapolis, 2007.
26. https://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/fit/publ/thesis_Susitaival_04.pdf (kolovoz 2015.)
27. <https://web.fe.up.pt/~mricardo/doc/ieeehandbook/ieeehandbook.pdf>
28. <https://www.10gea.org/images/CISCO-MPLS-Concept.pdf>
29. http://www.h3c.com/portal/Products___Solutions/Technology/MPLS/Technology_White_Paper/200806/608770_57_0.htm
30. <https://www.scribd.com/doc/110757653/UPOREDNA-ANALIZA-ATM-MPLS-I-GMPLS-MRE%C5%BDA>
31. Mrvelj, Š, Bošnjak, I: primjeri i zadaci iz telekomunikacijskog prometa, Zagreb, 2000.

POPIS SLIKA

Slika 1. Paketski bazirana višeuslužna mreža	3
Slika 2. Prikaz OSI referentnog modela	7
Slika 3. Pozicija MPLS u OSI modelu	8
Slika 4. Klasifikacija usmjerivačkih protokola	10
Slika 5. Prikaz autonomnih sustava.....	11
Slika 6. Prikaz usmjeravanja u IP mreži.....	15
Slika 7. Prikaz MPLS zaglavlja.....	19
Slika 8. Prikaz MPLS domene i pripadajućih LSR-ova	20
Slika 9. Prikaz prolaska paketa kroz LSP.....	21
Slika 10. Prikaz MPLS operacija.....	24
Slika 11. Prikaz problema zagušenja linka tradicionalnim usmjeravanjem	25
Slika 12. MPLS TE.....	26
Slika 13. Prikaz dva načina usmjeravanja u MPLS mreži.....	29
Slika 14. Stabla usmjeravanja za dvije strategije usmjeravanja	32
Slika 15. Mrežna topologija za MPLS mrežu	33
Slika 16. Primjer stabla za put između čvorova 13-11	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz usporedbe pojedinih parametara	17
Tablica 2. Tablica usmjeravanja	31
Tablica 3. Tablica usmjeravanja za zadanu MPLS mrežnu topologiju.....	33
Tablica 4. Stabla usmjeravanja za upravljanje s izvorišta uz prenošenje	34
Tablica 5. Stabla usmjeravanja za usmjeravanje s izvorišta	38
Tablica 6. Proračun za usmjeravanja upravljanje s izvorišta uz prenošenje.....	42
Tablica 7. Proračun za usmjeravanja upravljanje s izvorišta	42

POPIS KRATICA

2G – *Second Generation of Mobile Telecommunications*

3G - *Third Generation of Mobile Telecommunications*

AS - *Autonomous System*

ATM - *Asynchronous Transfer Mode*

AToM - *Any Transport over MPLS*

BoS - *Bottom of Stack*

CSPF - *Constrained Shortest Path*

EIGRP - *Enhanced Interior Gateway Routing Protocol*

ER-LSP - *Explicitly Routed Label-switched path*

EXP - *Eksperimental use*

FEC - *Forwarding Equivalence Class*

FR – *Frame Relay*

IBGP - *Internal BGP (Border Gateway Protocol)*

IBM - *International Business Machines*

IETEF - *The Internet Engineering Task Force*

IGRP - *Interior Gateway Routing Protocol*

ILM - *Incoming Label Map*

IP - *Internet Protocol*

IPV4 - *Internet Protocol version 4*

IPV6 - *Internet Protocol version 6*

ISDN - *Integrated Services for Digital Network*

IS-IS - *Intermediate System to Intermediate System*

ISO - *International Organization for Standardization*

ISP - *Internet Service Provider*

ITU - *The International Telecommunication Union*

LDP - *Label Distribution Protocol*

LER - *Label Edge Router*

LMDS - *Local Multipoint Distribution Service*
LSP - *Label-Switched Path*
LSR - *Label Switch Router*
MBPS - *Megabits per second*
MPLS - *Multiprotocol Label Switching*
MPLS QOS - *MPLS Quality of Service*
MPLS TE - *MPLS Traffic Engineering*
MPOA - *Multiprotocol over ATM*
MSN – *Multiservice Network*
NGN – *Next Generation Network*
NHLFE - *Next-Hop Label Forwarding Entry*
NNGOS - *Node-to-Node Grade of Service*
OSI - *Open Systems Interconnection model*
OSPF - *Open Shortest Path First*
PPP - *Point-to-Point Protocol*
PSTN - *Public Switched Telephone Network*
QOS - *Quality of Service*
RFC - *Request for Comments*
RIP - *Routing Information Protocol*
RVSP - *The Resource Reservation Protocol*
SDH - *Synchronous Digital Hierarchy*
SLA - *Service-Level Agreement*
SONET - *Synchronous Optical Networking*
TCP - *Transmission Control Protocol*
TOS - *Type of Service*
TTL - *Time to Live*
UDP - *User Datagram Protocol*
VPN - *Virtual Private Network*
WLAN - *Wireless Local Area Network*